

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
der Ludwig-Maximilian-Universität München

Direktor: Prof. Dr. R. Hickel

Reparatur dentaler Restaurationskomposite

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnheilkunde
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Veronika Baur

2012

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: PD Dr. Dipl.-Ing. Nicoleta Ilie

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Andrea Wichelhaus

PD Dr. Florian Beuer

Dekan: Prof. Dr. med Dr. h.c. M. Reiser, FACR, FRCR

Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.2012

Für meine Familie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Kompositreparaturen als minimalinvasive Behandlungsmethode.....	6
2.1	Die Füllungsreparatur – Vorteile, Entwicklungen, Problematiken, Methoden.....	7
2.2	Gründe für das Scheitern plastisch verarbeiteter Komposite.....	11
2.3	Hauptgründe für die Reparatur von Kompositen.....	13
2.3.1	Polymerisationsschrumpfung.....	14
2.3.2	Verschleiß.....	15
2.4	Klassifikation der Komposite.....	16
2.4.1	Matrix	17
2.4.1.1	Reine methacrylat-basierte Komposite.....	17
2.4.1.2	Ormocer-basierte Komposite.....	21
2.4.1.3	Siloran-basierte Komposite.....	22
2.4.2	Füllkörpergröße.....	25
2.4.2.1	Makrofüller.....	25
2.4.2.2	Mikrofüller.....	26
2.4.2.3	Hybridkomposite.....	27
2.4.3	Füllkörpermenge.....	28
2.4.3.1	Komposite niedriger Viskosität.....	28

2.4.3.2	Komposite hoher Viskosität.....	29
2.4.4	Verbundphase.....	29
3	Material und Methode.....	31
3.1	Verwendete Materialien.....	31
3.2	Probenherstellung.....	33
3.3	Alterung und thermische Belastung der Prüfkörper.....	36
3.4	Testverfahren.....	37
3.5	Brucharten.....	38
4	Ergebnisse.....	40
5	Diskussion.....	49
5.1	Diskussion von Material und Methode.....	49
5.1.1	Verwendete Materialien.....	50
5.1.2	Alterung der Prüfkörper.....	51
5.1.3	Oberflächenbehandlung und –konditionierung.....	53
5.2	Diskussion der Ergebnisse.....	58
6	Schlussfolgerungen.....	66
7	Zusammenfassung.....	67
8	Literaturverzeichnis.....	70

1 Einleitung

„Im Zweifel erhalten“ - dieser Ausspruch wird mittlerweile als allgemeingültiger Grundsatz in der Zahnmedizin angesehen und hat damit das früher internalisierte Prinzip „Im Zweifel ersetzen“ weitgehend verdrängt (Kamann und Gängler 2000). Der Wert der körpereigenen Zahnhartsubstanz, so könnte gesagt werden, lässt sich nicht (mehr) mit Gold aufwiegen und die Forschung ist entsprechend bestrebt, Restaurationsmöglichkeiten auszuloten, die die Zahnhartsubstanz vor invasiven Eingriffen schützen.

Bestand über Jahre das Behandlungskonzept einer beschädigten oder unzureichenden Füllung im kompletten Ersatz der Restauration, auch in Fällen von nur minimalen Defekten, gehen die Bestrebungen entsprechend seit einiger Zeit auch in der Füllungstherapie dazu über, mit minimalinvasiveren Ansätzen zu arbeiten (Kamann und Gängler 2000). Die langfristige Stabilität dentaler Kompositrestaurationen verbesserte sich rückblickend zwar stetig, dennoch können zahnärztliche Restaurationen keinen permanenten Ersatz für verlorengegangene Zahnhartsubstanz darstellen (Elderton 1990). Entsprechend der Vulnerabilität der Restaurationen beschäftigen sich schon seit den siebziger Jahren unterschiedliche Autoren mit der Frage nach Reparaturmöglichkeiten von Kompositfüllungen (Hotz 1975, Ahlers 1995) (Gregory et al. 1990). Bisherige Forschungsergebnisse erkennen der Reparatur insuffizienter Füllungen einen Vorzug gegenüber einem vollständigen Ersatz dieser an. Zudem unterstützen unterschiedliche ökonomische und behandlungsstrategische Aspekte die Methode der Füllungsreparatur (Kamann und Gängler 2000). Durch rückläufige Kariesprävalenz sind Restaurationen heutzutage durchschnittlich länger in Funktion als früher. Dies führt dazu, die Ursachen des Scheiterns einer Füllung tendenziell mehr im materialtechnischen Versagen zu suchen (Kamann und Gängler 2000). Die stetige Erweiterung des Spektrums auf dem Markt befindlicher Kompositmaterialien wirft natürlich auch die Frage auf, wie sich die jeweiligen Materialien bei der Reparatur verhalten. Folgende Fragestellungen stehen dabei im

Vordergrund: Erhält man besseren Verbund, wenn man nur Gleiches mit Gleichem repariert oder sind Komposite unterschiedlicher Materialklassen kompatibel? Gibt es optimale Kombinationsmöglichkeiten von Kompositen unterschiedlicher Materialklassen bei der Reparatur? Gerade wenn es im klinischen Alltag für den jeweiligen Behandelnden nicht immer möglich ist, vorhandene Komposite zu klassifizieren, ist es von Bedeutung zu wissen, ob eine Kompatibilität verschiedener Komposite unterschiedlicher organischer Matrices besteht und damit akzeptable Verbundfestigkeiten erreicht werden können.

Die vorliegende Studie widmet sich diesen Fragestellungen. In einer Versuchsreihe soll dafür die Verbundfestigkeit sechs verschiedener, nach bestimmten Kriterien ausgewählter Komposite beziehungsweise ihrer 36 Kombinationsmöglichkeiten ausgetestet werden. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, werden als repräsentative Vertreter wichtiger Materialklassen rein methacrylat-basierte Komposite mit der Stoffklasse der ormocer-basierten Komposite und der siloran-basierten Komposite, welche erst 2007 auf dem Markt eingeführt wurden, verglichen. Die Auswahl der Komposite bezog sich zudem auf deren Füllstoffanteil und damit auf deren unterschiedliche Viskosität.

Zahlreiche Autoren beschäftigen sich im Rahmen der Füllungsreparatur vorwiegend mit der Frage der Zwischenagentien und der Methode für eine optimale Vorbehandlung der Substratoberfläche. In dieser Studie wurden in beiden Fällen einheitliche Muster gewählt, um den Blickpunkt ausschließlich auf den Vergleich der Verbundfestigkeiten der Kombinationen verschiedener Komposite zu lenken.

Das Hauptziel dieser Studie ist es also, durch Schertestverfahren die jeweiligen Verbundfestigkeiten der Komposite zu evaluieren und die Ergebnisse bezüglich der chemischen Zusammensetzung, dem Füllstoffanteil, sowie auch der Bruchmodi zu überprüfen. Folgende Fragestellungen wurden neben der Hauptfrage nach verbundstarken Kombinationen beleuchtet: Welchen Einfluss besitzt die chemische Matrix auf die

Verbundfestigkeit von Füllungsreparaturen? Ergeben Materialien, die mit dem gleichen Komposit repariert werden generell höhere Verbundfestigkeiten? Welche Auswirkungen hat die Materialklasse hinsichtlich der Füllstoffe auf die Verbundfestigkeit von Reparaturfüllungen? Besteht ein Zusammenhang zwischen der Verbundfestigkeit und dem Bruchverhalten?

Nach einer Übersicht des aktuellen Forschungsstandes und der Darlegung der Eigenschaften und der allgemeinen Klassifikationsmöglichkeiten von Kompositen in Kapitel zwei, stellt das dritte Kapitel Material und Methode der vorliegenden Labortests vor. Die in Kapitel vier präsentierten Ergebnisse werden in Bezug auf vorher gemachte Angaben im fünften Kapitel diskutiert.

Mit der vorliegenden Studie soll dazu beigetragen werden, den aktuellen Grundsatz der modernen Zahnmedizin „Im Zweifel erhalten“ operabler werden zu lassen.

2 Kompositreparaturen als minimalinvasive Behandlungsmethode

Der Einsatz der Schmelz-Ätz-Technik ab den fünfziger Jahren markiert den Beginn einer Revolution in der konservierenden Zahnheilkunde (Buonocore 1955). Fissurenversiegelungen wurden die Vorläufer der minimalinvasiven Behandlungsstrategie, die sich kontinuierlich über viele Jahre verbreitete. Das zunehmende Verständnis des Karies-Prozesses und die Fortschritte in der Adhäsivtechnik forderten, wie eingangs erläutert, entsprechend eine allmähliche Verlagerung der Philosophie „Extention for Prevention“ (Black 1895) hin zu „Prevention of Extention“ – „Im Zweifel erhalten“ statt „Im Zweifel ersetzen“.

Die Reparatur einer defekten Füllung als schonende Alternative zur Entfernung der vorhandenen Restauration steht ganz im Sinne der minimal-invasiven Methodik. Die Entscheidung gegen den kompletten Ersatz und für die Reparatur einer Füllung basiert natürlich auf einem Abwägen hinsichtlich deren vorhandener Qualität. In der konkreten Entscheidungssituation scheinen dabei der subjektiv bewertete Gesamtzustand der Primärrestauration, das Material der Primärrestauration und eine arbiträre Kosten-Nutzen-Analyse eine wesentliche Rolle zu spielen (Mjör et al. 1993).

Derzeit verfügbare Longitudinalstudien zeigen, dass eine Reparatur von Kompositfüllungen in den ersten drei Jahren ähnliche Überlebensraten hat wie eine komplett ersetzte Restauration (Moncada et al. 2009). Diese Erkenntnis unterstützt die derzeitige Ansicht, dass eine Reparatur, ganz im Sinne der Philosophie minimalinvasiver Behandlungsweisen, grundsätzlich in Betracht gezogen werden sollte. Sharif spricht im Rahmen seiner Beschäftigung mit der Frage der Füllungsreparatur von einem zunehmend wichtigeren präventiven Verfahren, das den Verlust von Zahnhartsubstanz minimiert (Sharif et al. 2010). Wie in Punkt 2.2 näher erläutert, geht durch eine Sekundärversorgung mehr Zahnhartsubstanz verloren als nach der Größe der ursprünglichen Läsion eigentlich zu ersetzen war. Folglich nimmt mit jeder Füllungserneuerung die Defekt- und somit die Restauraionsgröße zu und es

kommen Zweifel auf, ob der Ersatz plastischer Füllungswerkstoffe in jedem Fall Sinn macht. *Krejci* spricht bezüglich der Entfernung von Kompositfüllungen von einem etwa doppelt so hohen Substanzverlust im Vergleich zur Entfernung einer Amalgam- oder Glasinonomerzementfüllung (*Krejci et al. 1995*). Dies ist mit Sicherheit darauf zurückzuführen, dass moderne Kompositmaterialien immer besser farblich an Schmelz und Dentin angepasst werden und somit im Falle der Entfernung schlechter von der Zahnhartsubstanz unterschieden werden können.

Der Trend in der restaurativen Zahnheilkunde hin zur Reparatur defekter Kompositrestaurationen macht deren Optimierung erforderlich. Eine besondere Rolle spielt dabei der forschende Blick auf angewendete Materialien. Desiderate, wie die Langlebigkeit des Zahnersatzes zu erhöhen, nicht unnötigerweise Zahnschubstanz zu opfern und Traumata des Pulpagewebes zu vermeiden, können dann besser eingelöst werden, wenn für die Reparatur dentaler Restaurationskomposite relevante Materialien und Methoden in aller Form erschlossen sind.

2.1 Die Füllungsreparatur – Vorteile, Entwicklungen, Problematiken, Methoden

Unter einer Füllungsreparatur versteht man im Allgemeinen das selektive Ersetzen von Füllungsanteilen. In der vorliegenden Studie wird dies, im Sinne eines nachträglichen Auftragens von Komposit auf eine bestehende Füllung, als additive Methode begriffen. Sie ist von subtraktiven Maßnahmen, also einem lediglichen Beseitigen überschüssigen Materials, abzugrenzen. Weiter lassen sich eine homotype Reparatur, wofür Primär- und Reparaturfüllung gleichen Materials verwendet wird, von einer heterotypen Reparatur unterscheiden (*Kamann und Gängler 2000*). Je nach zeitlicher Beziehung zwischen Primärrestauration und Reparaturfüllung wird von einer Frühreparatur im Gegensatz zu einer

Spätreparatur gesprochen. Bei der Spätreparatur liegt eine gealterte Füllungs Oberfläche vor, da diese vom Zeitpunkt der Frühreparatur an schon über einen unterschiedlich langen Zeitraum dem oralen Milieu ausgesetzt wurde. Die vorliegende Arbeit setzt sich mit Spätreparaturen und entsprechenden Materialgegebenheiten auseinander und geht sowohl homotypen als auch heterotypen Reparaturen nach.

Im Allgemeinen wird die Reparatur von Kompositrestaurationen als konservativere Behandlungsoption im Gegensatz zum kompletten Austausch einer Füllung angesehen. Neben einer Zeitersparnis im Behandlungsvorgang spricht für die Reparatur vor allem die erhöhte Überlebenswahrscheinlichkeit des behandelten Zahnes und die niedrigere Behandlungsbelastung für den Patienten (Mjör et al. 1993). Der vollständige Ersatz einer defekten Füllung ist technisch anspruchsvoller und führt fast zwangsläufig zu zunehmender Größe der Kavität (Krejci et al. 1995). Außerdem kann diese Behandlungsmaßnahme zu einer übermäßigen Schwächung der restlichen Zahnhartsubstanz führen und Reizungen des Pulpagewebes hervorrufen (Krejci et al. 1995). Das Umgehen eines Füllungsaustauschs durch die Füllungsreparatur kann folglich als wissenschaftlich fundiertes Desiderat gewertet werden. Trotzdem stellt die material- und methodenbedingte Verbundfestigkeit reparierter Füllungen nach wie vor eine Herausforderung für den zahnmedizinischen Fortschritt dar. Im Folgenden soll anhand eines kurzen historischen Abrisses auf bisherige Errungenschaften und anhaltende Forschungslücken eingegangen werden.

Schon bald nach der Einführung lichthärtender Komposite in die Dentalmedizin wurde die Frage nach der Reparaturfähigkeit dieser Materialien aufgeworfen und noch heute kontrovers diskutiert (Hotz 1975) (Chan, Boyer 1983). Hotz zeigte schon in den siebziger Jahren, dass mit Haftvermittlern ein Verbund von Substrat- und Reparaturkomposit möglich ist. Verschiedene Autoren räumten diesbezüglich ein, dass die Haftfestigkeit bei älteren Füllungen geringer als die Kohäsionskräfte einer nicht reparierten Füllung sei, hielten den

Verbund aber für vergleichbar mit der erzielbaren Haftung am Schmelz (Lutz et. al. 1975). Daraufhin wurden zahlreiche Studien zu Kompositreparaturen durchgeführt, die vor allem auf die Konditionierung der Oberfläche der Substrat-Füllung und den Einsatz von Haftvermittlersystemen eingingen (Brosh et al. 1977, Magni et al. 2010, Özcan et al. 2006, Papacchini et al. 2007, Rathke et al. 2008, Rinasti et al. 2010, Yesilyurt et al. 2009). Jüngere Studien legten schließlich ein Augenmerk auf den Einfluss von Lagerungszeiten und -bedingungen, sowie den Einfluss der verschiedenen Kompositklassen auf die Haftfestigkeit (Hahnel et al. 2010, Ivanovas et al. 2010, Lührs et al. 2010).

Chan und Boyer legten in ihrer Studie 1983 dar, dass die Kombination verschiedener Kompositmaterialien im Vergleich zu homolog reparierten Prüfkörpern grundsätzlich geringere Scherfestigkeiten ergibt. Keines der hierzu getesteten Materialien erwies sich in der Studie als ideales Substrat- oder Reparaturmaterial. Jedoch stellte sich heraus, dass sowohl Mikrofüllerkomposite als auch konventionelle Komposite zur gegenseitigen Reparatur geeignet sein können, wenn es sich damit um Komposite gleichen Matrixtyps handelt (Chan und Boyer 1983). Da man bisher von einer Kompatibilität marktüblicher, methacrylat-basierter Komposite ausging, wurden Rückschlüsse auf Reparatüreigenschaften bis dato oft auf die in Kompositen enthaltenen Füllkörper zurückgeführt und weniger mit den Matrixtypen in Zusammenhang gebracht (Ahlers, 2006). Untersuchungen ließen jedoch keine aussagekräftige Beziehung zwischen Reparatur Erfolg und Art, Menge und Größe der Füllkörper herstellen (Boyer et al. 1984) (Swift et al. 1994). Man widmete sich den Matrixtypen. Gemäß der Studien von *Vankerhoven* und *Roulet* liegt eine Abhängigkeit zwischen der Zusammensetzung der Matrix eines Komposits und dem Gehalt an freien Methacrylatgruppen vor (Vankerhoven et al. 1982, Roulet 1987).

Neben oben genannten Forschungsarbeiten zu den Beziehungen zwischen Kompositbestandteilen und Verbundfestigkeiten reparierter Füllungen, widmeten sich auch

verschiedene Studien der Methodik einer optimalen und klinikgerechten Vorbehandlung der an der Füllungsreparatur beteiligten Anteile. So konnte festgestellt werden, dass sich nach der Alterung von Restaurationen und nach Politur der Füllungsoberflächen der Gehalt an Doppelbindungen, die für die Schichtung des Komposits relevant sind, verringert (Vankerhoven et al. 1982). Verschiedene Methoden der in-vitro Alterung, wie Lagerung in destilliertem Wasser bei 37 Grad Celsius (Ahlers, 2006), das Kochen in Wasser (Brendeke et al. 2007), das Thermowechselbad (Frankenberger et al. 2003) (Papacchini et al. 2007) oder das Tauchbad in Zitronensäure (Brendeke et al., 2007) wurden durchgeführt, um belastende Bedingungen im oralen Milieu, und damit den Prozess der Alterung, zu simulieren (Hahnel et al. 2010, Frankenberger et al. 2003, Papacchini et al. 2007).

Neuere Studien haben gezeigt, dass der Erfolg von Komposit-zu-Komposit-Bindungen von verschiedenen Faktoren, wie dem Zustand der Substratoberfläche, der genauen Kompositzusammensetzung, der Benetzbarkeit und der Methoden der Oberflächenbehandlung des Substrats abhängt (Papacchini et al. 2007, Özcan et al. 2007). Die Haftung eines frischen Komposits an einem gealterten Substrat kann durch die Kombination von mikromechanischer Retention mit chemisch-physikalischer Bindung durch Haftvermittler gefördert werden (Brosh et al. 1997, Papacchini et al. 2007). *Frankenberger, Rathke und Rodrigues* bestätigten die Annahme, dass mechanisches Anrauen gealterter Kompositoberflächen, zusammen mit dem Gebrauch geeigneter Adhäsivsysteme, die Verbundfestigkeit signifikant erhöhen (Frankenberger et al. 2003) (Rathke et al. 2008) (Rodrigues et al. 2009). Zur mechanischen Oberflächenbearbeitung werden neben rotierenden Schleifkörpern auch Sandstrahlgeräte benutzt (Frankenberger et al. 2003). Das Einbringen von Unterschnitten bringt laut Studien dagegen keine Verbesserung, da diese häufig nicht vollständig gefüllt werden können und zu erhöhtem Materialstress führen (Shen et al. 2004). Die Forschung zu den auf unterschiedliche Komposite basierenden Adhäsivsystemen kann noch nicht als abgeschlossen begriffen werden. Bislang wurden Schmelzhaftvermittler (Swift

et al. 1994) und Dentinhaftvermittler (Papacchini et al. 2007, Rathke et al. 2008) sowie selbststützende Systeme, wie zum Beispiel Prime&Bond (Dentsply DeTray) oder OptiBond Solo Plus SE (Kerr), verwendet. Zusätzlich wurden speziell für Komposit-Reparaturen neuere Systeme eingeführt (Clearfil Repair Kit, Ecusit). Die Untersuchung der genannten Haftvermittlersysteme hinterließ streuende Ergebnisse.

Neuere Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz fließfähiger Komposite die Verbundfestigkeit (Papacchini et al., 2008) und die marginale Integrität (Frankenberger et al., 2003) von Reparaturen ebenso verbessern können wie Adhäsivsysteme. *Tezvergil* hebt diesbezüglich im Gegensatz zu *Rodrigues* eine positive Korrelation zwischen der Anwendung eines Silans und der Reparaturhaftfestigkeit hervor (Tezvergil et al. 2003, Rodrigues et al. 2008). Die alleinige Anwendung eines Silans wird jedoch nach wie vor kontrovers betrachtet. *Papacchini* beobachtete eine Verbesserung des Verbunds durch Anwendung eines Silans, wenn dieses warm luftgetrocknet wurde (Papacchini et al. 2007). Konkludierend lässt sich aus den bisherigen Forschungsergebnissen schließen, dass zur Reparatur von Kompositfüllungen das mechanische Anrauen der Oberflächen einer bestehenden Kompositfüllung und die anschließende Verwendung eines Haftvermittlers in Form eines Adhäsivs oder niedrigviskösen Komposits notwendig ist, um einen zuverlässige Verbund zu erhalten.

2.2 Gründe für das Scheitern plastisch verarbeiteter Komposite

Das Ersetzen von Restaurationen macht etwa 50 bis 60 Prozent der operativen Tätigkeiten in der zahnärztlichen Praxis aus (Mjör et al. 1989). Obgleich einige Studien, die sich mit der Lebensdauer von Kompositrestaurationen befassen sehr unterschiedliche Forschungsergebnisse aufweisen, konnte die ungefähre Haltbarkeit einer Kompositfüllung auf einen Zeitraum von sechs bis acht Jahren geschätzt werden (Forss & Widstrom et al. 2004,

Redman et al. 2003, Opdam et al. 2007). Sie ist von material-, belastungs- und verarbeitungstechnischen Variablen abhängig und kann entsprechend differieren (Bartlett und Sundaran 2006). Große Unterschiede in Studiendesigns und in der Auswahl verwendeter Materialien in diversen Studien erschweren einen direkten Vergleich der Haltbarkeit von Kompositfüllungen zusätzlich.

Nach *Hickel* muss im Allgemeinen zwischen frühem Scheitern und spätem Scheitern einer Restauration unterschieden werden (Hickel et al. 2001). Zu den Ursachen frühen Scheiterns zählen vor allem der unsachgemäße Umgang mit den Materialien, eine insuffiziente Polymerisation und postoperative Beschwerden. Sekundärkaries, marginale Defekte und marginale Verfärbungen sowie Zahnfrakturen werden dagegen als Hauptgründe für das späte Scheitern einer Restauration verantwortlich gemacht (Hickel et al. 2001, Mjör et al. 2000). In einer Studie von *Burke* konnte Sekundärkaries als die häufigste Ursache für die Notwendigkeit des Ersatzes von Kompositrestaurationen identifiziert werden. Weitere Gründe für Füllungserneuerungen und -reparaturen sind Zahnfrakturen, marginale Frakturen, Füllungsfrakturen, Schmerzen, Randverfärbungen, unzureichende anatomische Form und Materialänderungen (Burke et al. 1999). Eine neuere Studie von *Asghar* gibt für die Häufigkeit genannter Hauptgründe des Scheiterns Sekundärkaries mit 52,3% an, gefolgt von Verfärbungen (16,9%) und Frakturen von Füllungen (12,6%) (Asghar et al. 2010). *Brunthaler et al.* wertete in seiner Studie zur Langlebigkeit von Kompositrestaurationen im Seitenzahngebiet prospektive Studien zwischen 1996 und 2002 aus. Als Hauptgründe für das Scheitern von Kompositfüllungen ließen sich dort ebenfalls Sekundärkaries, Füllungsfrakturen und marginale Defekte ausmachen, wobei in den ersten fünf Jahren nach der Füllungslegung eine Dominanz von Kompositfrakturen verzeichnet werden konnte. Nach sechs bis siebzehn Jahren wurde dagegen Sekundärkaries als Hauptgrund angegeben (Brunthaler et al. 2003). Trotz stetiger material- und verarbeitungstechnischer Weiterentwicklung erfahren Komposite chemischen Abbau und Verschleiß in Abhängigkeit

vom verwendeten Material, der Polymerisationsschrumpfung und dem jeweiligen intraoralen Milieu (Söderholm et al. 1987). Selbst bei optimaler Verarbeitung sind Komposite anfällig für intraorale Zersetzungsprozesse (Lutz et al. 1975, Roulet 1987). Die Folgen sind erhöhter Verschleiß mit Substanzverlusten und/oder die Einlagerung von Farbstoffen. Im Rahmen der technikintensiven Verarbeitung von Kompositen lassen sich ebenfalls Gründe für das Scheitern von Kompositrestaurationen ausmachen. So führen bei der Anwendung von Dentinadhäsiven zum Beispiel zu langes Anätzen, Übertrocknung nach dem Ätzvorgang oder nach Applikation des Primers zu deutlich verminderter Verbundfestigkeit sowie Spaltbildung (Frankenberger et al. 2000).

2.3 Hauptgründe für die Reparatur von Kompositen

Komposite besitzen zahlreiche Eigenschaften, die durch behandlungsstrategische Aspekte beeinflusst werden können und vom jeweiligen intraoralen Milieu abhängig sind. Dazu gehören unter anderem Quellung und Wasseraufnahme, Löslichkeit, Polymerisationsschrumpfung und Verschleiß. Um den Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht zu sprengen, werden im Folgenden lediglich die Punkte Polymerisationsschrumpfung und Verschleiß näher beschrieben. Beide Faktoren machen häufig eine Reparatur bereits vorhandener Kompositfüllungen notwendig.

Die Polymerisationsschrumpfung der Kompositmatrix erfährt durch die Entwicklung und Erforschung neuartiger Materialien besondere Aufmerksamkeit und ist bei jedem Vorgang der Aushärtung zu bedenken. Da in der Versuchsreihe der vorliegenden Arbeit die 2007 auf dem Markt neu eingeführten Silorane (Filtek Silorane) als eines der Testmaterialien gewählt wurden, erscheint eine kurze Darstellung der Polymerisationsschrumpfung sinnvoll. Wenn der Verbund zur Zahnhartsubstanz intakt geblieben ist und eine Füllung als ‚abgenutzt‘ oder frakturiert eingestuft werden kann, ist die Methode der Füllungsreparatur in Betracht zu ziehen. Verschleiß, der auch Frakturen und Absplitterung impliziert, ist entsprechend im

Zusammenhang mit der hier besprochenen Thematik als zentrale Eigenschaft zu werten und kurz vorzustellen.

2.3.1 Polymerisationsschrumpfung

Mit Ausnahme der siloran-basierten Komposite findet bei der Aushärtung der heute gängigen lichthärtenden Kompositsysteme eine radikalische Polymerisation statt. Über den Mechanismus der radikalischen Polymerisation bildet sich aus den Monomeren ein dreidimensionales Polymernetzwerk. Dieser Vorgang kann in die Teilvorgänge Initiation, Wachstumsreaktion, Quervernetzung und Kettenabbruch eingeteilt werden. Bei diesem Mechanismus geht das Radikal eine kovalente Bindung mit einem Elektronendonator ein – meist die C=C Doppelbindung der Monomere – und das Molekül wird selbst wieder zum Radikal (Maxkors 2005). Die Anzahl der dabei umgewandelten Doppelbindungen wird als Konversionsrate bezeichnet (Dewaele et al. 2006). Durch Rekombination und Dispositionierung findet ein Kettenabbruch statt. Mit dem beschriebenen Polymerisationsvorgang ist auch immer eine Polymerisationsschrumpfung verbunden. Sie ist damit zu erklären, dass vor der Polymerisation die Monomermoleküle durch sekundäre Kohäsionskräfte, den sogenannten van der Waals – Kräften, zusammengehalten werden. Während der Polymerisation wird diese Art von Bindung durch kovalente Einzelbindungen ersetzt, welche einen geringeren Abstand haben. Die dadurch verursachte Kontraktion verursacht den größten Teil der Polymerisationsschrumpfung (Dewaele et al. 2006). Durch die Schrumpfung entstehen elastizitätsmodulabhängige Spannungen auf den Verbund zwischen Zahn und Komposit, welche die Verbindung zwischen Zahnhartsubstanz und Restauration verschlechtern. Die Folge daraus kann die Bildung eines Spalts an den Rändern der Restauration sein, der seinerseits zu postoperativen Sensibilitäten, Sekundärkaries, Fraktur der Restauration, marginaler Verschlechterung und Verfärbungen führen kann. Neuere Studien zeigen, dass die Richtung und der Betrag der Schrumpfungsvektoren hauptsächlich

von der Beschaffenheit der Kontaktflächen zwischen Füllungswerkstoff und Zahnhartsubstanz und nur in geringem Maße von der Position der Lichtquelle abhängt (Versluis, Tantbirojn 1998). Um die Folgen der bei der Polymerisation entstehenden Schrumpfungsvorgänge zu begrenzen, die im ungünstigsten Fall sogar zu Frakturen der Zahnhartsubstanz (Lambrechts et al. 1987) führen können, sind differenzierte Präparations- und Verarbeitungsstrategien eingeführt worden. Zu diesen gehören die Anwendung oben bereits erwähnter Haftvermittler beziehungsweise die Schmelzätztechnik, sowie die Applikation des Füllungswerkstoffes mit der ‚Inkrementtechnik‘. Sofern der Hersteller keine anderen Angaben vorgibt, sind dabei nach geeigneter Vorbehandlung maximal zwei Millimeter starke Inkremente in Einzelschritten zu applizieren und nacheinander auszuhärten (Versluis et al. 1996).

2.3.2 Verschleiß

Der Werkstoffverschleiß bezeichnet den fortschreitenden Materialverlust eines festen Körpers. In der Zahnmedizin unterscheidet man je nach Ursache und Form unterschiedliche Formen des Substanzverlustes von Zähnen und des Verschleißes von Kompositfüllungen. Dazu zählen unter anderem die Abrasion, die Attrition, die Erosion oder die Demastikation. Bezüglich Kompositfüllungen taucht außerdem der Begriff der ‚Ermüdung‘ auf. Hier werden verschiedene Vorgänge wie ‚bulk fracture‘, also den plötzlichen Verlust größerer Anteile von Füllungsmaterial, ‚surface pitting‘, was die Ausbildung von Grübchen auf der Füllungsoberfläche bezeichnet oder ‚chipping‘, also das Absplittern großer Füllungsanteile in Randbereichen unterschieden (Kunzelmann 1998).

Die Verbindung der Füllstoffe zur Matrix gilt allgemein als Schwachstelle der Komposite (Lutz et al. 1983). So wurden drei Jahre nach Füllungslegung an okklusalen Kontaktzonen durchschnittlich 200 µm Werkstoffverlust gemessen (Roulet et al. 1980). Dabei können große Härte und hohe Zugfestigkeit durchaus mit einer geringen Verschleißfestigkeit einhergehen

(Harrison et al. 1976). Der Verschleiß beginnt in der Regel mit einer Schädigung der Matrix. Eine nicht durch Füllkörper geschützte Matrix kann durch Verschleißpartikel beschleunigt abgetragen werden. Freigelegte Füllkörper werden herausgelöst oder zertrümmert und wirken zusätzlich abrasiv (Finger et al. 1977). Der Nachweis einer Temperaturabhängigkeit der Substanzverluste lässt auf eine Schwächung der Bindung zwischen Füllkörper und Matrix durch deren unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten schließen (Alexandridis et al. 1984). Zusätzlich führt der unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizient von Schmelz, Dentin und modernen Kompositen bei häufigem Temperaturwechsel zu Spannungen im Verbundbereich zwischen Füllung und Zahn (Versluis et al. 1996). Hieraus können Spalten resultieren. Auch chemische Auflösungsvorgänge scheinen zum Substanzverlust beizutragen (Roulet et al. 1978). Gerade bei genanntem Absplittern von Füllungsanteilen oder bei der Ausbildung von Grübchen an Füllungsoberflächen ist die Reparatur einer sonst intakten Füllung dem vollständigem Ersatz vorzuziehen.

2.4 Klassifikation der Komposite

Heute werden Komposite als zusammengesetzte, zahnfarbene, mit anorganischen Füllstoffen verstärkte Füllungsmaterialien, die eine Kunststoffmatrix besitzen, definiert (Hellwig, Klimek, Attin 2007). Die Vielzahl ihrer unterschiedlichen Komponenten lässt sich auf drei Hauptbestandteile reduzieren: die organische Matrix, die darin enthaltenen Füllkörper (disperse Phase), sowie die Verbundphase, welche jene Füllkörper in der organischen Matrix verankert. Die Entwicklung der modernen, heute verwendeten Kompositmaterialien geht bis in die sechziger Jahre zurück. In diesem Zeitraum verstärkte sich der Wunsch nach zahnfarbenen Restaurationen, worauf Bowen 1962 ein neues Monomer entwickelte. Dieses sogenannte Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat (Bis-GMA) wurde ein wesentlicher Baustein der Komposite. Das Dimethacrylat wurde mit anorganischen Füllstoffpartikeln versehen und

durch Silanisierung konnte ein Verbund zwischen organischer Matrix und den anorganischen Füllstoffen hergestellt werden.

Auf die drei genannten Hauptbestandteile eines Komposits wird im Folgenden kurz eingegangen.

2.4.1 Matrix

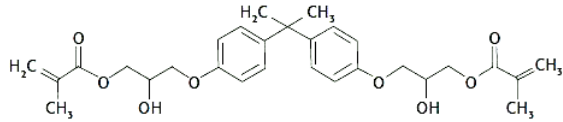
Da die Eigenschaften der Komposite wesentlich von Art und Menge der Füllkörper abhängig sind, gibt es in der Dentalliteratur ein großes Angebot an Publikationen über Füllkörper. Aber gerade in den letzten Jahren wurde auch vermehrt ein Augenmerk auf die Optimierungsmöglichkeiten der Komposit-Matrix gelegt. Zu den altbewährten methacrylat-basierten Kompositen wurden 2007 Silorane mit der Intention in den Markt eingeführt, die Probleme der Polymerisationsschrumpfung, des Polymerisationsstresses und der Wasseraufnahme zu lösen. Auch die ormocer-basierten Füllungsmaterialien wurden vor einiger Zeit entwickelt, um sowohl die Polymerisationsschrumpfung, als auch die mechanischen Eigenschaften zu optimieren. Im Folgenden werden diese drei Komposit-Klassen kurz dargestellt.

2.4.1.1 Reine methacrylat-basierte Komposite

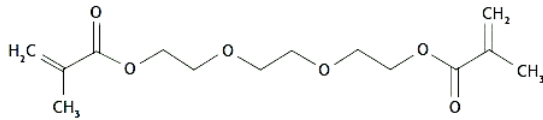
Die organische Matrix besteht im nicht ausgehärteten Zustand aus Monomeren, wobei es sich hierbei fast ausschließlich um mehrfunktionelle Methacrylate handelt. Zusätzlich sind Initiatoren, Stabilisatoren, Farbstoffe, Pigmente und andere Additiva beigelegt. Das bis heute am häufigsten verwendete Monomer in Dentalkompositen ist Bisphenol-A-glycidyl-dimethacrylat (Bis-GMA). Weitere wichtige Methacrylate (Abbildung 1) sind Urethan(-

ethylenglykol-)dimethacrylat (UDMA), Triethylenglykol-dimethacrylate (TEGDMA), Bisphenol-A-ethoxyliertes Dimethacrylate (Bis-EMA), ethoxyliertes Bisphenol-A-dimethacrylate (EBPDMA) und „Tetracarboxylsäure-dihydroxyethyl-methacrylatester“ (TBC) (Guggenberger, Weinmann 2000). Bis-GMA trägt als Basis der Polymermatrix aufgrund seines rigiden Ringsystems wesentlich zur Festigkeit des Komposits bei. Bis-GMA weist allerdings durch Wasserstoffbrücken zwischen den Molekülen und die starre Molekülstruktur hohe Viskositäten auf, woraus eine geringe Füllstoffaufnahme und schlechte Verarbeitbarkeit resultieren (Glenn 1979). Da sich in die hochviskösen Matrizen nur eine geringe Menge an anorganischen Füllstoffen einmischen lässt, müssen niedermolekulare Komonomere zur Verdünnung beigegeben werden. Diese Verdüner (z.B. TEGDMA) reagieren zu einem geringeren Teil mit den Monomeren und stellen daher den höchsten Anteil an Restmonomeren dar (Glenn 1982). Gleichzeitig ist Bis-GMA aufgrund der Hydroxylgruppen auch verhältnismäßig hydrophil, was im Laufe der Zeit intraoral eine Quellung der Polymere bedingt. Diese verschlechtert die mechanischen Eigenschaften der Komposite, weil Wasser die Silanverbindung zwischen der Matrix und den Füllkörpern hydrolysieren kann (Roeters et al. 2009). Manche Hersteller verwenden alternativ zu Bis-GMA UDMA, welches die Viskosität des Monomers bei vergleichbarer Polymerisationsschrumpfung verringert. UDMA besitzt flexible Seitenketten, wodurch die Anzahl der reagierten Doppelbindungen erhöht wird (Peutzfeld 1997). In vergangener Zeit haben die Hersteller vorrangig in die Entwicklung von niedrig-schrumpfenden Kompositen investiert und seit kurzem sind einige dieser Materialien wie z.B. Tricyclodecan-Urethandimethacrylat (TCD-Urethan, Abbildung 2) oder Komposite auf Dimer-Säure Basis (N'Durance, Septodont, Niederkassel, Deutschland) klinisch im Einsatz (Boaro et al. 2010). TCD-Urethan ist ein dünnflüssiges Monomer, bei dem laut Herstellerangaben auf den Einsatz von oben genannten Verdünnern, die für eine erhöhte Polymerisationsschrumpfung von Bis-GMA basierten Kompositen verantwortlich sind, verzichtet wurde (Venus Diamond, Haereus

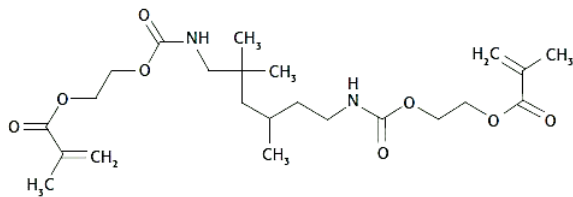
Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) (Boaro et al. 2010). DuPont entwickelte zusammen mit GC (GC, Tokio, Japan) ein neuartiges Monomer „DX-511“, dass laut Herstellerangaben auch eine besonders niedrige Polymerisationsschrumpfung, einen niedrigen Polymerisationsstress sowie eine hohe Verschleißfestigkeit besitzt (Kalore, GC).



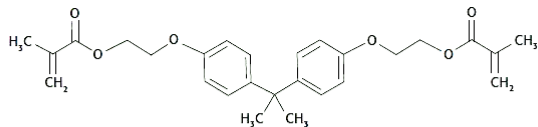
Bis-GMA 2,2-bis[4-(2-Hydroxy-3-Methacryloyloxypropyl)Phenyl]Propan
Bisphenol-A-diglycidyl-methacrylat



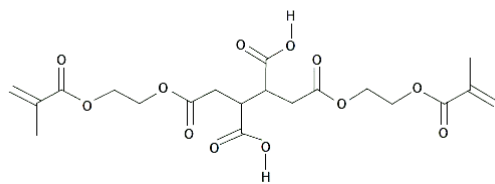
TEGDMA (1,2-Ethandiyl-bis(oxy-2,1-ethandiyl)bis(2-methyl-2-propenoat)
Triethylenglykol-dimethacrylat



UDMA 1,6-bis[2-Methacryloyloxyethoxycarbonylamino]-2,4,4-Trimethylhexan
Urethandimethacrylat
Urethan(-ethylenglykol-)dimethacrylat



Bis-EMA 2,2-bis[4-(2-Hydroxy-3-Methacryloyloxydiethoxy)Phenyl]Propan
Bisphenol-A ethoxyliertes Dimethacrylat
oder
EBPDMA
Ethoxyliertes Bisphenol-A-dimethacrylat



TCB Butan-1,2,3,4-tetracarbonsäure, bis[2-hydroxyethylmethacrylat] Ester
„Tetracarboxylic acid-hydroxyethylmethacrylate-ester“

Abbildung 1: In Dentalkompositen häufig vorkommende Dimethacrylate (Guggenberger, Weinmann, 2000)

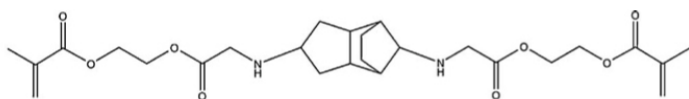


Abbildung 2: Tricyclodecan-Urethandimethacrylat (TCD-Urethan) (Boaro et al. 2010)

2.4.1.2 Ormocer-basierte Komposite

Der Begriff Ormocere ist ein Akronym aus den Begriffen „organically modiefied ceramic“ (Greiwe 1990). Die Ormocere haben im Gegensatz zu konventionellen Kompositen ein auf Polysiloxanen (Si-O-Si) basierendes, vopolymerisiertes, anorganisches Rückgrat, welches mit organischen Methacrylatgruppen modifiziert ist, die wiederum für die Photopolymerisation verantwortlich sind (Abbildung 3). Eine Vernetzung findet nach dem Polymerisationsstart statt. Ausgangspunkt für die Ormocere sind teilkondensierte Silane und Methacryl-Silane. Durch Hydrolyse und Kondensation von Siloxanen (Silikon, Sauerstoff, Alkan) entsteht ein anorganisches Polysiloxannetzwerk (Ormocer-Oligomere), in welches organische polymerisierbare Gruppen eingebaut werden. Aus diesen Oligo-Ormoceren können durch Polymerisation dreidimensionale Netzwerke aufgebaut werden (Müh 2001). Die Materialeigenschaften sind mit denen der modernen Feinstpartikelhybridkomposite zu vergleichen (Hellwig 2007).

Das Hauptaugenmerk zur Verbesserung der Komposite liegt allgemein auf einer Reduzierung der Polymerisationsschrumpfung, einer Verbesserung des Randschlusses, einer erhöhten Verschleißfestigkeit und einer hohen Biokompatibilität (Mozner, Salz 2007). In einer Studie konnte für das ormocer-basierte Füllungsmaterial Admira (Voco GmbH, Cuxhaven, Deutschland) eine höhere Härte und Verschleißfestigkeit, verglichen zu Hybridkompositen, nachgewiesen werden (Tagtekin 2004). Ormocer-basierte Komposite haben ein Schrumpfungsverhalten, das trotz des niedrigeren Füllstoffgehalts gleich ist, wie das der Hybridkomposite (Cattani-Lorente 2001). Insgesamt besteht bei den ormocer-basierten Kompositen Bedarf an klinischen Langzeitstudien. *Ilie* spricht allgemein jedoch von mechanischen Eigenschaften, die sich von den konventionellen Hybrid-Kompositen nicht unterscheiden (Ilie, Hickel 2009). Laut Herstellerangaben besitzt Admira eine sehr hohe Biokompatibilität sowie eine gesteigerte Ästhetik (Voco GmbH, Cuxhaven, Deutschland).

Derzeit gibt es noch keine Ormocere ohne Methacrylatanteil auf dem Markt. Jedoch zeigen noch experimentelle Ormocere, welche ohne Dimethacrylat-Anteil aus Amin oder Amid Dimethacrylat Trialkoxysilanen entwickelt wurden, ein verbessertes Biegeelastizitätsmodul als die ormocer-basierten Komposite und gelten so als vielversprechende Materialklasse für die Zukunft (Mozner 2008).

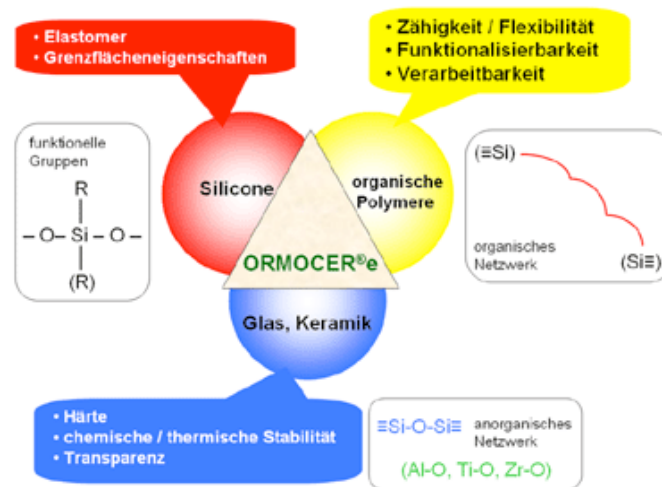


Abbildung 3: ORMOCER[®]e: Anorganisch-organische Hybridpolymere (Marke der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Würzburg)

2.4.1.3 Siloran-basierte Komposite

Siloran-basierte Komposite wurden 2007 auf dem Markt eingeführt und liegen der Idee zugrunde, Moleküle zu verwenden, deren Form sich bei der Polymerisation ändert, so dass das Molekül nach einer solchen Veränderung mehr Volumen beansprucht. Ein ähnliches Prinzip wird bei konventionellen Methacrylaten verfolgt, in dem der Füllstoffanteil erhöht und dadurch das Matrixvolumen ersetzt wird, was die Polymerisationsschrumpfung ebenfalls verringert. Nur ist diese Methode begrenzt, da der Füllkörperanteil nicht beliebig erhöht werden kann. Die Matrix der Silorane enthält Füllkörper aus SiO₂ und Yttriumfluorid (3M

ESPE). Die siloran-basierten Komposite, bestehend aus Siloxan- und Oxiran-Komponenten, weisen eine reduzierte Volumenschrumpfung von etwa ein Prozent auf (Weinmann et al. 2005). Dieser Sachverhalt ist damit zu erklären, dass, im Gegensatz zu der Polymerisationsreaktion der Methacrylate bei den Siloranen im ersten Schritt eine Spaltung und Öffnung der Ringmoleküle stattfindet. Dieser Prozess führt zu einem Platzgewinn und wirkt dem Volumenverlust entgegen, der zwangsläufig auftritt, wenn die chemischen Bindungen gebildet werden. Analog zur Radikalkettenreaktion wird die Polymerisation bei den Siloranen durch ein Kation gestartet. Durch Anlagerung eines sauren Kations an den Oxiran-Ring wird dieser geöffnet und bildet gleichzeitig ein neues Zentrum, ein sogenanntes Carbokation, welches die Polymerisation weiter fortschreiten lässt (Weinmann et al. 2005). Für die kationische Polymerisation wurde ein neues Photoinitiatorsystem entwickelt, welches aus einer lichtabsorbierenden Komponente, einem Elektronendonator und einem Iodoniumsalz besteht (Oxman, Jacobs 2000). Die kationische Polymerisation wird erst durch den Verfall des Iodoniumsalzes gestartet, wenn durch die Polymerisationslampe eine bestimmte Menge an Campherchinon mit einem Elektronendonator reagiert hat (Weinmann et al. 2005). Für die kationische Polymerisation der Silorane ist es notwendig, auch die funktionelle Verbindung zwischen Füllstoffen und Matrix so zu verändern, dass sie kationisch mit der Matrix reagiert. An der Stelle der Methacrylgruppen bei konventionellen dentalen Kompositen findet man bei den Siloranen eine Epoxydgruppe. Für den chemischen Verbund zwischen Matrix und Füllkörpern werden die Füllstoffe mit einer Silanverbindung vorbehandelt. Es konnte gezeigt werden, dass siloran-basierte Komposite gute mechanische Eigenschaften besitzen, die klinisch vergleichbar mit denen der methacrylat-basierten Komposite sind (Ilie, Hickel 2009). Auch *Leprince et al.* konnten keine signifikanten Unterschiede der Biegefestigkeit zwischen siloran-basierten und methacrylat-basierten Füllungswerkstoffen feststellen (Leprince et al. 2010).

Weiter ist das Siloranmolekül sehr hydrophob (Weinmann et al. 2005). Durch die vier funktionellen Gruppen (Abbildung 4) kann eine stabilere Vernetzung stattfinden, wovon sich der Hersteller eine hohe Langzeitqualität der mechanischen und chemischen Eigenschaften verspricht. In einer Studie von *Eick et al.* waren die Silorane stabil und unlöslicher in biologischen Flüssigkeiten, die durch wässrige Lösungen mit Epoxidhydrolase, Schweineleberesterase oder verdünnten Chlorwasserstoff simuliert wurden (Eick et al. 2006). Auch *Palin et al.* konnten eine verringerte Wasseraufnahme und Löslichkeit im Vergleich zu konventionellen Methacrylaten zeigen (Palin et al. 2005). Derzeit wird jedoch immer noch kontrovers diskutiert, inwieweit eine verringerte Wasseraufnahme klinisch tatsächlich von Bedeutung ist. In einer Studie von 2004 wurden erstmals die mutagene Aktivität von Oxiranen und Siloranen geschätzt. Es wurden Analysen zur Mikrokernbildung (Chromosomenaberration) sowie zur Auslösung von Genmutationen (HPRT-Assay) in Säugetierzellen durchgeführt. Man kam zu dem Ergebnis, dass das mutagene Potential verschiedener Silorane viel niedriger ist, als das der verwandten Oxirane (Schweikl et al. 2004).

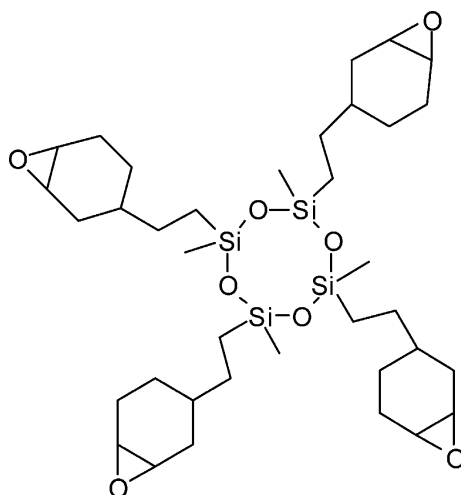


Abbildung 4: Silorane Monomer (Weinmann et al. 2005)

2.4.2 Füllkörpergröße

Die Füllstoffe sind wesentlich für die physikalisch-mechanischen Eigenschaften verantwortlich. Sie sollen die Abrieb-, Druck- und Zugfestigkeit, den Elastizitätsmodul (E-Modul) und die Verschleißfestigkeit des Materials verbessern. Zudem erreicht man durch sie eine Verringerung der Polymerisationsschrumpfung, der Wasseraufnahme sowie des thermischen Expansionskoeffizienten (Glenn 1982).

Die wesentlichen qualitativen Fortschritte der Komposite wurden überwiegend durch Weiterentwicklung des Füllkörpersystems erzielt. Aus diesem Grund ist die Klassifikation der Komposite anhand der Füllkörper von großer Bedeutung.

2.4.2.1 Makrofüller

Die ersten Füllkörper mit einer durchschnittlichen Teilchengröße von zehn bis fünfzehn Mikrometer (Lutz, Setcos et al. 1983) wurden ausschließlich durch Mahlprozesse aus Quarz, Glas oder Keramik hergestellt und hatten eine sehr hohe Festigkeit (Maxkors 2005). Der Verbund zwischen organischer Matrix und Füllkörpern zeigte bei steigender Belastung Instabilität. Die Makrofüller-Komposite besaßen deshalb den Nachteil, dass bereits bei geringer Belastung Füllkörper im Ganzen aus der Matrix ausbrechen und Unebenheiten im Gefüge hinterlassen konnten. Die Größe der Füllkörper wirkte sich auch negativ auf das Polierverhalten aus. Weitere Nachteile waren ein schlechtes Verschleißverhalten und erleichterte Plaquebesiedelung sowie eine inakzeptable Ästhetik. Aus genannten Gründen werden reine Makrofüller-Komposite heute nicht mehr in der zahnmedizinischen Füllungstherapie eingesetzt.

2.4.2.2 Mikrofüller

Um die Polierbarkeit der Füllungswerkstoffe zu verbessern und um eine größere Abrasionsstabilität zu erreichen, konzentrierte sich die weitere Entwicklung auf eine Verkleinerung der Füllstoffpartikel. Eine damals verfügbare Alternative zu den Makrofüllkörpern waren die durch Flammenpyrolyse hergestellten Mikrofüller mit einer durchschnittlichen Größe von unter 0,1 μm . Die äußerst feinen Siliziumdioxidkörper erreichen keinen hohen Füllstoffanteil, was bedeutet, dass weniger Polymervolumen durch Mikrofüller ersetzt werden, sodass eine höhere Polymerisationsschrumpfung zu beobachten ist. Ein weiterer Nachteil ist die geringe mechanische Belastbarkeit. Mikrofüller sind jedoch hervorragend polierbar. Von homogenen Mikrofüllern spricht man, wenn die Füllstoffe direkt in die organische Matrix eingemischt werden. Inhomogene Mikrofüller weisen dagegen eine Mischung von direkt in die Matrix eingebrachten Körpern mit Vorpolymerisaten auf. (Wegmann, Darwish et al. 1983). Dadurch kann die Polymerisationsschrumpfung inhomogener Mikrofüllerkomposite auf ein akzeptables Maß begrenzt werden, ohne den Vorteil der exzellenten Polierfähigkeit einzubüßen (Maxkors 2005). Mit diesen Werkstoffen werden günstigere Abrasionseigenschaften als bei den konventionellen Kompositen erreicht, jedoch ist die Polymerisationsschrumpfung höher und die mechanische Belastung geringer (Maxkors 2005) (Hellwig 2007). Das Konzept der inhomogenen Mikrofüllerkomposite hat sich auf Grund der guten Polierbarkeit und auf Grund eines geringeren E-Moduls für Frontzahnrestaurationen und Klasse V Füllungen bis heute bewährt. Die mechanische Festigkeit der inhomogenen Mikrofüllerkomposite reicht jedoch nicht aus, um sie im kaudrucktragenden Bereich der Seitenzähne einzusetzen. Dies wurde erst durch die Kombination von Mikrofüllern mit fein bis feinst gemahlenen Füllkörpern aus Quarz, Glas oder Keramik bei den Hybridkompositen möglich (Maxkors 2005, Hellwig 2007).

2.4.2.3 Hybridkomposite

Der Begriff Hybridkomposite soll ausdrücken, dass durch Mischung gemahlener Glasfüllkörper und pyrogen hergestellten Mikrofüllern eine Kombination geschaffen wird, die die Vorteile beider Systeme vereint, ohne deren Nachteile zu übernehmen. Man spricht von einem System, das eine „bi- oder multi-modale“ Größenverteilung aufweist (Hickel, Dasch et al. 1999). Der gesamte Füllkörperanteil der Hybridkomposite lässt sich auf etwa 85 Gewichtsprozent steigern. In Hybridkompositen kommen Füllkörper verschiedener Art (Gläser, Siliziumdioxide, Keramiken, Quarze und auch Vorpolymerisate) und Größe zum Einsatz. Durch die Weiterentwicklung der Mahltechniken von Gläsern wurde es möglich, die mittlere Partikelgröße der Glasfüllstoffe weiter zu reduzieren. Somit ergibt sich eine weitere Unterteilung der Hybridkomposite, die durch die mittlere Partikelgröße der Glasfüllstoffe charakterisiert ist. Während der Oberbegriff „Hybridkomposit“ durch eine mittlere Füllkörpergröße von bis zu zehn Mikrometern definiert ist, enthält ein „Feinpartikelhybridkomposit“ Füllkörper von bis zu fünf Mikrometern. Weiterhin unterscheidet man die Hybridkomposite in ein „Feinstpartikelhybridkomposit“ mit einer mittleren Füllkörpergröße von bis zu drei Mikrometern und in ein „Submikrometerhybridkomposit“ mit einer mittleren Füllkörpergröße von unter einem Mikrometer. Innerhalb der zahnfarbenen, plastischen Füllungsmaterialien haben die Fein-, Feinst- und Submikrometerhybridkomposite den größten Anteil und gelten heute als universelle Kompositmaterialien. Durch die geringe Polymerisationsschrumpfung und Wasseraufnahme, die guten mechanischen Eigenschaften, wie hohe Druck-, Verschleiß- und Abriebfestigkeit sowie die gute Ästhetik, Oberflächenbeschaffenheit und Modellierbarkeit, sind Hybridkomposite universell einsetzbar (Peutzfeld 1997).

2.4.3 Füllkörpermenge

Durch Variation des Füllkörperanteils kann die Viskosität des Komposits stark beeinflusst werden. Damit ändern sich Verarbeitung und mechanische Eigenschaften des Füllungswerkstoffes wie Biege-, Druck- und Verschleißfestigkeit. Da niedrig visköse Komposite nicht für große Defekte Verwendung finden und damit auch als alleiniges Reparaturmaterial für einen größeren Defekt einer Kompositfüllung nicht geeignet sind, wird diese Materialklasse im Folgenden zwar kurz vorgestellt, jedoch in dieser Untersuchungsreihe, im Gegensatz zu den hochviskösen Füllungswerkstoffen, nicht als Material benutzt.

2.4.3.1 Komposite niedriger Viskosität

Durch Verringerung des Füllstoffanteils oder Zusatz von verdünnenden Matrixbestandteilen (z.B. TEGDMA) entstehen die sogenannten ‚flowable composites‘. Diese niedrigviskösen, fließfähigen Komposite wurden ursprünglich für den Zahnhalsbereich konzipiert. Dies ist bei Klasse-V-Kavitäten dann vorteilhaft, wenn sich Zähne durch okklusale Belastungen deformieren. Der Elastizitätsmodul ist stark verringert. Durch elastische Kompensation der Bewegungen innerhalb des Materials soll die Bildung von Randspalten oder Absplitterungen des Materials im Randbereich reduziert werden. Des Weiteren eignen sich niedrigvisköse Komposite auch für minimal-invasive Kavitäten, da sie eine sehr gute Benetzung des Dentins ermöglichen. Die physikalisch-mechanischen Eigenschaften, insbesondere Biege-, Druck- und Verschleißfestigkeit sind allgemein als schlechter einzustufen als die der Hybridkomposite. Auch *Ilie und Hickel* hielten in ihrer Studie von 2009 fest, dass fließfähige Komposite und Kompomere allgemein schlechtere mechanische Eigenschaften besitzen als Hybridkomposite, stopfbare Komposite, Ormocere, Nanokomposite oder Kompomere (Ilie,

Hickel 2009). Die Polymerisationsschrumpfung ist erhöht. Sie zeichnen sich jedoch durch ihr hervorragendes Anfließverhalten an Kavitätenränder beziehungsweise in Fissuren aus, sodass ihr Haupteinsatzgebiet die (erweiterte) Fissurenversiegelung und die Verwendung als erste Kunststoffschicht zur Benetzung des Kavitätenbodens im Sinne der sogenannten „composite-bonded-to-flowable“ Technik ist (Heidemann 2005).

2.4.3.2 Komposite hoher Viskosität

Stopfbare Komposite wurden speziell für den Einsatz im Seitenzahngebiet entwickelt, um eine ähnliche Verarbeitung, wie Amalgam sie bietet, zu ermöglichen. Es wird vermutet, dass die Ausformung des approximalen Kontaktpunktes bei der Verwendung der Matrizentechnik erleichtert wird (Hervas-Garcia et al. 2006). Durch eine Erhöhung des Füllstoffanteils sollen diese Komposite verbesserte Materialeigenschaften aufweisen und eine deutlich erhöhte Viskosität besitzen. Die Entwicklung dieser hochgefüllten Komposite soll außerdem eine bessere Verschleißresistenz garantieren und die Anfälligkeit für Frakturen minimieren. Der Anspruch einer höheren Verschleißresistenz konnte allerdings bisher nicht bestätigt werden (Manhart et al. 2000) und die Gestaltung des Approximalkontaktes bleibt primär eine Verarbeitungsfrage. Verschiedene Studien über die mechanischen Eigenschaften der ‚Packables‘ konnten keinen signifikanten Unterschied zu der Gruppe der Hybrid-Komposite feststellen (Ilie 2009) (Choi et al. 2000).

2.4.4 Verbundphase

Da eine direkte Verbindung zwischen der organischen Komponente, also der Kunststoff-Matrix und der anorganischen Komponente, den Füllstoffen, nicht möglich ist, benötigt man ein ‚Kopplungsagens‘ mit amphiphilem Charakter. Nach der IUPAC-Nomenklatur sind Silane eine Stoffgruppe chemischer Verbindungen, die aus einem Siliziumgerüst und Wasserstoff bestehen. In der Zahnmedizin finden Silizium-Wasserstoff-Verbindungen Verwendung, die

auf einem organischen Grundgerüst basieren und den oben genannten amphiphilen Charakter haben (Lutz et al. 1983). Silane besitzen einen hydrophoben und einen hydrophilen Molekülanteil, welcher über eine hydrolysierbare Siliziumgruppe mit der Füllkörperoberfläche reagiert. Der hydrophobe Teil der Silane ist eine organische Methacrylgruppe, die den Verbund zur Kunststoffmatrix ermöglicht. Durch die Reaktion der Silane mit der hydrophilen Oberfläche der Füllstoffe wird deren Oberfläche hydrophob und die Verbindung mit der hydrophoben Kunststoffmatrix kann erfolgen. Somit lässt sich der Verbund zwischen Füllstoff und Kunststoffmatrix realisieren. Dieser Vorgang verbessert das Anfließverhalten der organischen Kunststoff-Matrix zu den Füllstoffen und ermöglicht so einen erhöhten Füllstoffgehalt (Lutz et al. 1983). Bei der Polymerisation werden durch die Mitreaktion sehr vieler Methacrylsäurereste die silanisierten Füllerpartikel schließlich in den Polymerverbund integriert. Durch die Einbindung des Füllstoffs in die Matrix werden die mechanischen Werte der Komposite deutlich erhöht.

3 Material und Methode

Im Folgenden soll auf Basis der bisher gegebenen Informationen zu Kompositen und ihren Bestandteilen, in Material und Methode der vorliegenden Studie eingeführt werden. Dieser faktischen Vorstellung der verwendeten Materialien, der Probenherstellung, dem Themenkomplex Alterung und thermische Belastung der Prüfkörper sowie des Testverfahrens folgt die Vorstellung der Ergebnisse der Studie und eine ausführliche Diskussion relevanter Punkte. In Erinnerung soll an dieser Stelle die vordergründigen Fragestellungen der Studie gerufen werden. Zum einen soll herausgefunden werden, ob sich bei der Reparatur ein besserer Verbund einstellt, wenn nur Gleiches mit Gleichem repariert wird oder ob Komposite unterschiedlicher Materialklassen kompatibel sind. Dem folgend liegt das Augenmerk dann zum anderen auf der Frage nach eventuellen optimalen Kombinationsmöglichkeiten von Kompositen unterschiedlicher Materialklassen bei der Reparatur. Eine sorgfältige Auswahl der eingesetzten Materialien war somit Ausgangspunkt der durchgeführten Versuchsreihen.

3.1 Verwendete Materialien

In der vorgenommenen Untersuchung wurden sechs verschiedene, lichthärtende Komposite aus den Kategorien mikrohybrid (Filtek Silorane, Esthet X, Admira), nanohybrid (Filtek Supreme XT, Ceram X Duo) und stopfbarer Komposit (Tetric ceram HB) auf ihre Reparabilität und Kompatibilität hin analysiert. Die verwendeten Materialien sind in Tabelle 1 und 2 dargestellt.

Tabelle 1: Verwendete Komposite

Komposit	Hersteller / LOT	Kunststoffmatrix	Füllkörper	Vol./Gew. %
Mikrohybrid				
Filtek Silorane	3M ESPE / 20090206, 20090107	bis-3,4- epoxycyclohexyl- ethylphenylmethylsi- lane, 3,4- Epoxy-cyclohexyl- cyclopoly-methylsilo- xan	quartz, Yttriumfluoride	55/76
Esthet X	Dentsply / 810271	BisGMA, BisEMA, TEGDMA	Ba-F-Al-B-Si Glas, SiO ₂	60/77
Admira	VOCO / 0904426	Ormocere, BisGMA, UDMA, TEGDMA, BHT	SiO ₂ , Ba-Al-B- Si Glas	63/81
Nanohybrid				
Filtek Supreme XT	3M ESPE / 20081110	BisGMA, BisEMA, UDMA, TEGDMA	ZrO/SiO ₂ , SiO ₂ nano- Füller	59,5/78,5
Ceram X Duo	Dentsply / 807003250, 811001324	MS, DM	Ba-Al-B-Si Glas, SiO ₂	57/76
Stopfbar				
Teric Ceram HB	Ivoclar-Vivadent / L28170	BisGMA, UDMA, TEGDMA	Ba Glas, Ba-Al- F-Si Glas, YbF, SiO ₂ , MO	56/78

Legende der verwendeten Abkürzungen: Bis-GMA bisphenol A diglycidylmethacrylate, Bis-EMA bisphenol A polyethylene glycol diether dimethacrylate, DM dimethacrylate resin, MS methacrylate-modified polysiloxane, TEGDMA triethyleneglycol dimethacrylate, UDMA urethane dimethacrylate, , Al Aluminium, Ba Barium, B Bor, MO gemischte Oxide, Si Silizium, SiO₂ Siliziumdioxid, YbF₃ Ytterbiumfluorid, ZrO Zirkonium Oxid

Außerdem wurde für die vorliegende Studie ein Reparaturset, bestehend aus vier Komponenten - einem phosphorhaltigen Ätzel, einem Primer, einem Adhäsiv und einem Silan - eingesetzt (Clearfil Repair, Kuaray, Tokio, Japan, siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Verwendetes Reparaturset

Reparaturset	LOT	Zusammensetzung	Gebrauchsanweisung
Clearfil Repair	41270		
K-etchand Gel	00444A	40% Phosphorsäure	15 sec Einwirkzeit, abwaschen, trocknen
Clearfil SE bond Primer	00877A	MDP, HEMA, Wasser	vermischen, 5 sec Einwirkdauer, leicht verblasen
Porcelain bond Aktivator	00231B	γ -MPS, Bis-phenol A polyethoxydimethacrylate, MPTS)	
Clearfil SE bond bond	01291A	MDP, Bis-GMA, HEMA, hydrophobic dimethacrylate, Kieselsäure	dünn auftragen, leicht verblasen, 10 sec Lichthärtung

Legende der verwendeten Abkürzungen: Bis-GMA bisphenol A diglycidil, HEMA 2-hydroxyethyl methacrylate, MDP 10-methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate, γ -MPS γ -methacryloxy propyltrimethoxy silane

3.2 Probenherstellung

Die Herstellung der Probehalter, die zur Füllung und Reparatur der Komposite dienten, erfolgte mit Hilfe von Stahlzylindern, die mit einem weißlichen, opaken, schnellhärtenden, kaltpolymerisierenden Kunststoff auf Polyacrylbasis (Technovit 4000®, Pulver und Sirup, Heraeus Kulzer, Wehrheim, Deutschland) gefüllt wurden. In der Mitte dieser Kunststoffbasis

wurde eine runde Kavität von zwei Millimetern Tiefe und sechs Millimetern Durchmesser präpariert. In diese Kavität wurden die jeweiligen Komposite eingebracht und, nach Glattstreifen und Abdecken mit einem Frasacostreifen, mit einem LED-Hochleistungspolymerisationsgerät (Bluephase LED[®], Ivoclar Vivadent, 1200 mW/cm², Seriennummer 1629243, Schaan, Liechtenstein) zwanzig Sekunden ausgehärtet, wobei die Lampe senkrecht und ohne Abstand zur Füllungsoberfläche positioniert war. Das Lichtaustrittsfenster der Lampe muss bei diesem Vorgang möglichst nahe am zu härtenden Komposit positioniert sein, um eine zuverlässige Aushärtung zu gewährleisten. Für alle Komposite wurden die Farbe A3 gewählt, um Fehler durch einen differierenden Pigmentgehalt zu minimieren. Die Polymerisationslampe wurde vor und nach jedem Aushärtungsvorgang auf Verunreinigung und Status der Batterieleistung kontrolliert. Die Oberflächen der Füllungen wurden mit einem Silikonkarbidpapier (400 GRIT, Leco, St. Joseph, USA) manuell angeraut und die Proben anschließend für acht Wochen gelagert. Vor der dann folgenden Füllungsreparatur wurden die Proben erneut manuell angeraut. Um die Füllungsoberfläche von Schleifpartikeln zu reinigen wurde diese für fünfzehn Sekunden mit 40% Phosphorsäuregel (Clearfil Repair) bedeckt, anschließend gründlich mit Wasser abgespült und mit Druckluft getrocknet. Der Haftvermittler wurde entsprechend den in Tabelle 2 aufgeführten Herstellerangaben aufgetragen und polymerisiert. Unter Zuhilfenahme einer Matrize wurde eine weitere Schicht der zu testenden Komposite in zwei Schritten á zwei Millimetern Höhe und drei Millimetern Durchmesser aufgetragen und jeweils zwanzig Sekunden polymerisiert. Diese vorab aus Registriersilikon angefertigte Matrize bestand aus zwei Hälften, mit denen sie einen zylindrischen Hohlraum von vier Millimetern Höhe umschloss. Sie ließ sich anschließend seitlich ohne Druck entfernen. Die mit diesem Vorgang fertig gestellten Proben wurden unmittelbar nach der Herstellung nochmals für 24 Stunden bei 37 Grad Celsius in destilliertem Wasser gelagert, um dann für 5000 Zyklen bei 5-55 Grad Celsius in ein Thermowechselbad getaucht zu werden. Auf dieses Procedere folgte eine

erneute Lagerung der Proben für 28 Tage bei 37 Grad Celsius in destilliertem Wasser. Abschließend wurden die Messungen zur Scherfestigkeit in einer Universalprüfmaschine (Willytec GmbH, Gräfelfing, Deutschland) durchgeführt. Ein schematischer Ablauf des Versuchsablaufs ist in Abbildung 5 dargestellt.

Alle sechs Komposite wurden in der Versuchsreihe einmal als Substrat verwendet, woraus sich eine Gruppenanzahl von 120 Prüfkörpern pro Komposit ergab. Jeder Komposit wurde mit allen sechs Füllungswerkstoffen repariert. Es ergaben sich somit 36 Kombinationsmöglichkeiten á zwanzig Proben. Alle verwendeten Komposite wurden mit hochvergüteten, dentalen Füllungsinstrumenten aus Edelstahl aufgetragen und nach jedem Schritt gründlich gereinigt. Die Füllungsmaterialien wurden nach Herstellerangaben und stets von der gleichen Person verarbeitet.

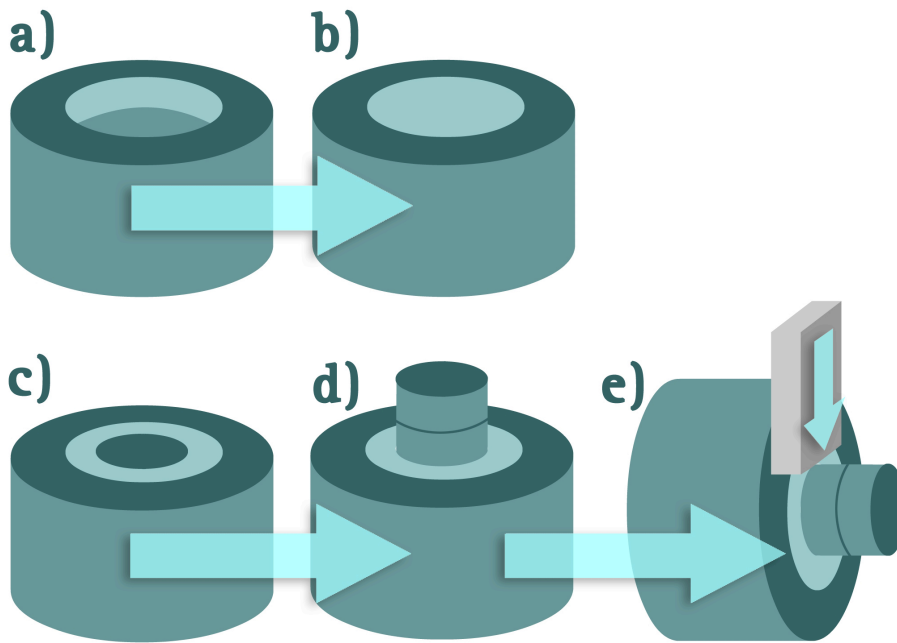


Abbildung 5: schematische Darstellung des Versuchsablauf a) Herstellung der Probehalter b) Füllen der Kavität mit dem Substrat-Komposit c) Behandlung der Oberfläche mittels dem Reparaturset d) Applikation des Reparatur-Komposits e) Messung der Verbundfestigkeit

3.3 Alterung und thermische Belastung der Prüfkörper

Alle Substrat-Füllungen wurden acht Wochen in 37 Grad Celsius warmem, destilliertem Wasser gelagert. Anschließend wurde die Oberfläche der Prüfkörper, wie in Punkt 3.2 erläutert, vorbehandelt.

Der Verbund der fertigen Prüfkörper wurde neben einer Lagerung in 37 Grad Celsius warmem, destilliertem Wasser auch, gemäß der DIN EN ISO 10477 (Amd. 1:1998), einer wechselnden Temperaturbelastung ausgesetzt. Dabei wurden die Proben in einem Thermowechselbad (Willytec GmbH, Gräfelfing, Deutschland) in abwechselnd fünf Grad Celsius und 55 Grad Celsius eingetaucht. Die Eintauchzeit betrug auf jeder Temperaturstufe

dreißig Sekunden. Es wurden genau 5000 Zyklen in destilliertem Wasser durchlaufen bevor die Proben erneut bei 37 Grad Celsius warmem Wasser weiter künstlich gealtert wurden.



Abbildung 6: Thermowechselbad

3.4 Testverfahren

Die Messungen zur Ermittlung der Scherfestigkeit erfolgten in einer Universalprüfmaschine (MCE 2000ST, Quicktest Prüfpartner GmbH, Langenfeld, Deutschland, Abb. 7). Dabei wurden die Proben mittels einer Drehschraube in der Prüfmaschine so eingespannt, dass der Scherstempel so nahe wie möglich an das erste Inkrement reichte, ohne es zu berühren. Das Prinzip der Scherkraftmessungen besteht darin, dass der Stempel mit integrierter Kraftmessung mit einer festgelegten, konstanten Geschwindigkeit gegen den in der Einspannvorrichtung befestigten Prüfkörper gefahren wird. Nachdem die Vorlast von einem Newton (N) auf die Probe gesetzt wird, bewegt sich der Scherstempel bei einer

Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 Millimetern pro Minute senkrecht zur Probe. Die Kraft steigt dann solange kontinuierlich an bis sie an einem bestimmten Punkt eine Fraktur des Prüfkörpers hervorruft. In diesem Moment wird der Test automatisch abgebrochen. Es lässt sich so die maximale Kraft ermitteln, bei deren Ausübung der Prüfkörper bricht. Die Scherfestigkeit errechnet sich aus Bruchlast pro Fläche der Reparaturfüllung und wird in Megapascal (MPa) angegeben. Definitionsgemäß entspricht die inkrementelle Verbundfestigkeit in MPa dem Quotienten aus maximaler Bruchkraft in N und Verbundfläche in mm^2 . Nach dem Bruch kann jeweils die genaue Bruchart identifiziert werden.

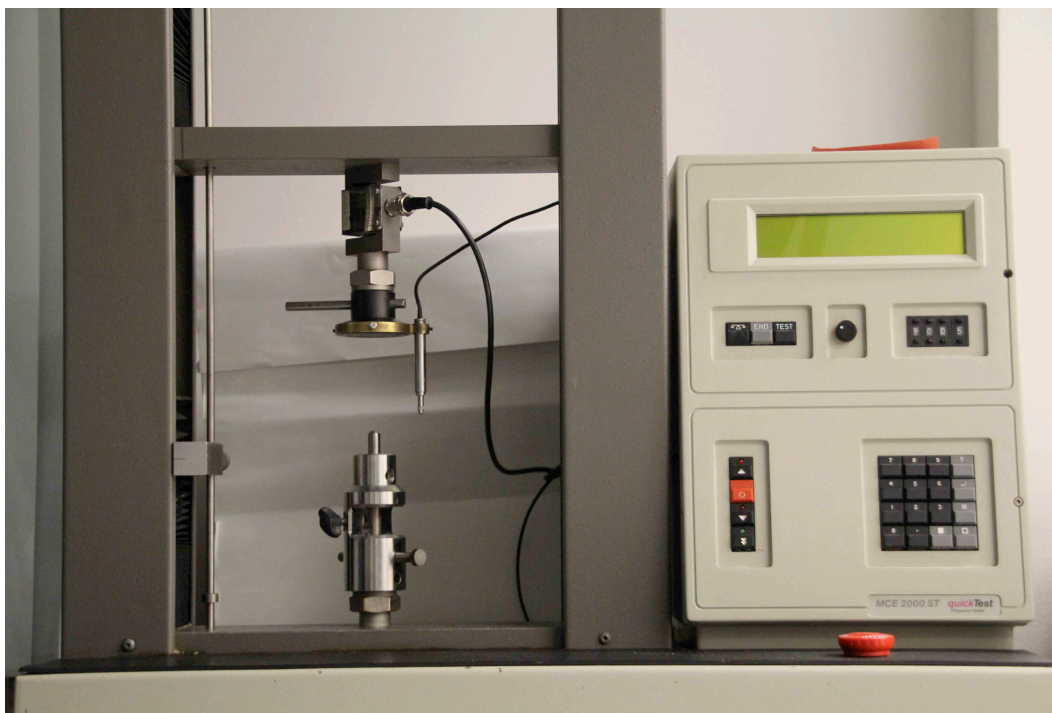


Abbildung 7: Universalprüfmaschine

3.5 Brucharten

Nach der Bestimmung der Scherfestigkeit erfolgte für die Studie eine genaue Analyse der Art des jeweiligen Bruches der beiden Kompositschichten. Dabei werden verschiedene Formen

des Frakturverlaufs unterschieden: Von einer kohäsiven Fraktur wird gesprochen, wenn der Frakturspalt innerhalb einer Kompositschicht liegt. Hierbei kann man noch unterscheiden, ob sich der kohäsive Bruch innerhalb des Substrats oder innerhalb des Reparatur-Komposits befindet. Als adhäsive Fraktur bezeichnet man einen Frakturspalt, der innerhalb der Verbundfläche beziehungsweise zwischen den Inkrementen von Substrat und Reparatur-Komposit verläuft. Ein Mischbruch liegt dann vor, wenn ein adhäsiver Frakturspalt mit einem kohäsiven Weiterverlauf, also innerhalb eines der beiden Inkremente, vorzufinden ist.

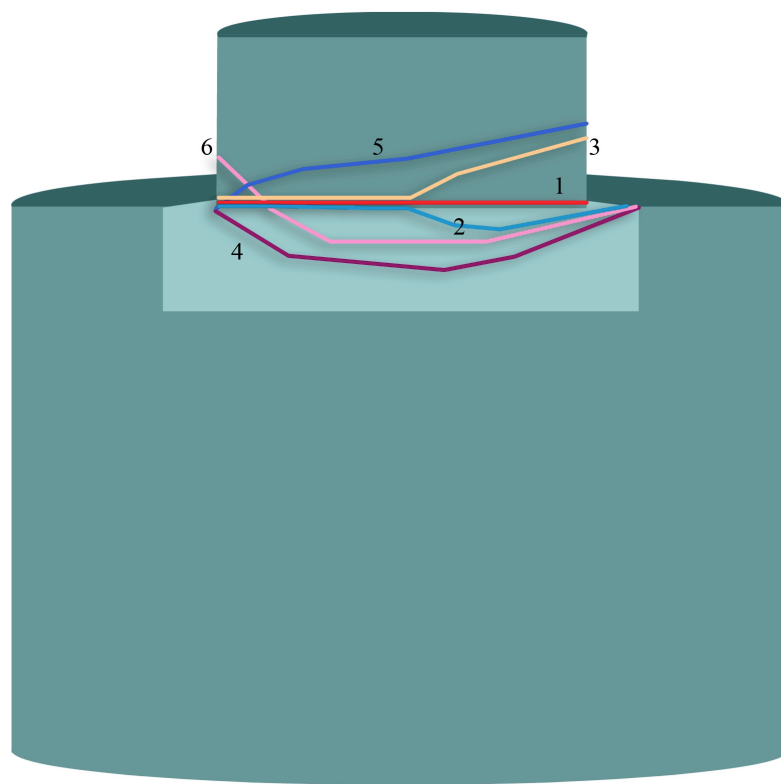


Abbildung 8: Brucharten

- 1: adhäsiver Bruch (Frakturverlauf innerhalb der Verbundfläche)
- 2: Mischbruch1 (adhäsiver Frakturspalt, kohäsiver Weiterverlauf im Substrat-Komposit)
- 3: Mischbruch 2 (adhäsiver Frakturspalt, kohäsiver Weiterverlauf im Reparatur-Komposit)
- 4: Kohäsiv 1 (Frakturverlauf innerhalb des Substrat-Komposits)
- 5: Kohäsiv 2 (Frakturverlauf innerhalb des Reparatur-Komposits)
- 6: Kohäsiv1/2 (Frakturverlauf in Substrat- und Reparatur-Komposit)

4 Ergebnisse

Die in den Tests erhobenen Daten wurden mit dem Statistikprogramm SPSS 19.0 (SPSS, Chicago, IL, USA) ausgewertet. Für die anschließende Analyse wurde mit der ANOVA Varianzanalyse untersucht, ob sich eine metrische, normalverteilte Variable auf den verschiedenen Stufen eines oder mehrerer Einflussfaktoren bezüglich ihres Mittelwerts unterscheidet. Der Tukey-HSD-Test dient als Post-Hoc-Test nach Durchführung der ANOVA und vergleicht die Mittelwerte. Die Effektgröße partielles η^2 (Eta-Quadrat) gibt den Anteil der aufgeklärten Varianz an der Gesamtvarianz auf der Stichprobenebene an. Die Berechnung erfolgt dabei über die Quadratsumme des systematischen Effekts, geteilt durch die gesamte Quadratsumme. Mit der Weibull-Statistik wird die Zuverlässigkeit der ermittelten Ergebnisse näher betrachtet. Das statistische Signifikanzlevel für die Studie lag bei $p < 0,05$.

Insgesamt wurden in der Auswertung der Verbundfestigkeit elf homogene Subgruppen identifiziert. Die Faktorstufen, die einer Subgruppe zugeordnet wurden, unterscheiden sich also hinsichtlich ihrer mittleren Festigkeit nicht signifikant. Bis auf fünf Materialkombinationen wurden alle Faktorstufen mehreren Subgruppen zugeordnet. Die folgende Tabelle zeigt Mittelwerte in Megapascal (MPa), Gruppenzuordnung (hochgestellt) und Standardabweichung (in Klammern) der Festigkeit, gegliedert nach Füllmaterial (Zeilen) und Reparaturmaterial (Spalten).

Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichungen (SA) der Verbundfestigkeit der verschiedenen Reparaturen (ANOVA)

Füllung\Reparatur	Filtek Silorane	Esthet X	Tetric ceram HB	Filtek Supreme XT	Ceram X duo	Admira
Filtek Silorane	17,2 ^{def} (9,9)	2,8 ^a (2)	2,0 ^a (2,3)	5,4 ^a (3,6)	13,2 ^{bcde} (8)	7,9 ^{abc} (4,4)
Esthet X	29,5 ^{ijk} (4,8)	30,1 ^{ijk} (10,2)	17,6 ^{def} (9,5)	8,2 ^{abc} (5,1)	12,1 ^{bcd} (4,3)	13,0 ^{bcde} (6,7)
Tetric Ceram HB	28,1 ^{hijk} (7,1)	34,7 ^k (7,8)	16,6 ^{cdef} (6)	12,1 ^{bcd} (5,2)	24,2 ^{ghij} (6,5)	22,8 ^{ghij} (4,9)
Filtek Supreme XT	31,5 ^{jk} (5,8)	27,2 ^{ghijk} (9,3)	16,7 ^{cdef} (8)	21,3 ^{efghi} (6,2)	18,2 ^{def} (9,6)	17,9 ^{def} (6,5)
Ceram X duo	29,9 ^{ijk} (5,6)	30,5 ^{jk} (8,8)	19,2 ^{defg} (8,4)	29,2 ^{ijk} (5,6)	30,7 ^{jk} (16,4)	30,7 ^{jk} (5,8)
Admira	36,0 ^k (5)	31,5 ^{jk} (8,6)	20 ^{defgh} (7,1)	29,7 ^{ijk} (6,5)	30,7 ^{jk} (6,6)	34,7 ^k (6,4)

Wie in Tabelle 3 ersichtlich, wurden die höchsten Festigkeiten mit den Kombinationen Admira als Füllmaterial mit Filtek Silorane als Reparaturmaterial, Admira als Füllmaterial mit Admira als Reparaturmaterial und mit Tetric Ceram HB als Füllmaterial mit Esthet X als Reparaturmaterial erzielt. Mit der Kombination Filtek Silorane als Füllmaterial mit den Methacrylaten Tetric Ceram HB, Esthet X oder Filtek Supreme XT als Reparaturmaterial konnten hingegen nur sehr geringe Festigkeiten erreicht werden.

Tabelle 4 zeigt im Überblick die Effektstärke der unterschiedlichen Einflussfaktoren. Es wurden jeweils zweifaktorielle Varianzanalysen mit Haupt- und Interaktionseffekten durchgeführt, um die Effekte von Füllung und Reparatur direkt vergleichen zu können.

Tabelle 4: Einflussgrößen auf die Verbundfestigkeit

Einflussfaktor	Festigkeit	Bruchart
Material Füllung	,516	,249
Material Reparatur	,293	,044
Material Füllung x Material Reparatur	,257	,167
Gruppe Füllung	,329	,171
Gruppe Reparatur	,114	,010
Gruppe Füllung x Gruppe Reparatur	,058	,039
Vol% Füllung	,516	,249
Vol% Reparatur	,293	,044
Vol% Füllung x Vol% Reparatur	,257	,167
Gew% Füllung	,163	,065
Gew% Reparatur	,152	,041
Gew% Füllung x Gew% Reparatur	,114	,097

Anhand der signifikanten Werte des partiellen Eta-Quadrats ist gut zu erkennen, dass das Füllungsmaterial generell einen stärkeren Einfluss auf Festigkeit und Bruchart besitzt als die Reparatur (höhere η^2 -Werte). Auch die Wechselwirkung von Füllung und Reparatur weist generell einen signifikanten Effekt auf, der bezüglich der Bruchart stets größer ist als der Effekt der Reparatur, aber kleiner als der Effekt der Füllung. Den größten Einfluss besitzt, wie sich aus der Tabelle entnehmen lässt, für beide Zielvariablen jeweils das Füllungsmaterial.

Die nachfolgende Tabelle zeigt, dass die Wirkung eines jeweiligen Materials auf die Festigkeit sehr unterschiedlich war, je nachdem, ob das Material als Füllung oder als Reparaturstoff verwendet wurde. Filtek Silorane beispielsweise führte im Mittel zur

geringsten Festigkeit, wenn es als Füllmaterial eingesetzt wurde. Als Reparaturmaterial dagegen führte es im Mittel zur höchsten Festigkeit.

Tabelle 5: Auswirkung der Materialien auf die Verbundfestigkeit

	Füllung		Reparatur	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Material				
Filtek Silorane	8,14	7,95	28,70	8,63
Esthet X	18,43	11,03	26,11	13,42
Tetric Ceram HB	23,10	9,64	15,55	9,29
Filtek Supreme XT	22,15	9,33	17,65	11,09
Ceram X duo	28,38	9,96	21,60	11,96
Admira	30,41	8,44	21,19	11,03
Materialgruppe				
Silorane	8,14	7,95	28,70	8,63
Methacrylate	21,23	10,20	19,78	12,25
Ormocere	29,39	9,27	21,40	11,48
Materialtyp				
mikrohybrid	21,41	12,91	25,62	11,93
nanohybrid	22,15	9,33	18,60	10,63
stopfbar	23,10	9,64	15,55	9,29
Volumenprozent				
55	8,14	7,95	28,70	8,63
56	30,41	8,44	21,19	11,03
57	28,38	9,96	21,60	11,96
59,5	22,15	9,33	17,65	11,09
60	18,43	11,03	26,11	13,42
63	23,10	9,64	15,55	9,29
Gewichtsprozent				
76	18,39	13,56	25,17	10,99
77	18,43	11,03	26,11	13,42
78	30,41	8,44	21,19	11,03
78,5	22,15	9,33	17,65	11,09
81	23,10	9,64	15,55	9,29

Die nachfolgende Grafik gibt eine Übersicht der Hauptbrucharten nach Gruppe und ihrer Vorkommenshäufigkeit:

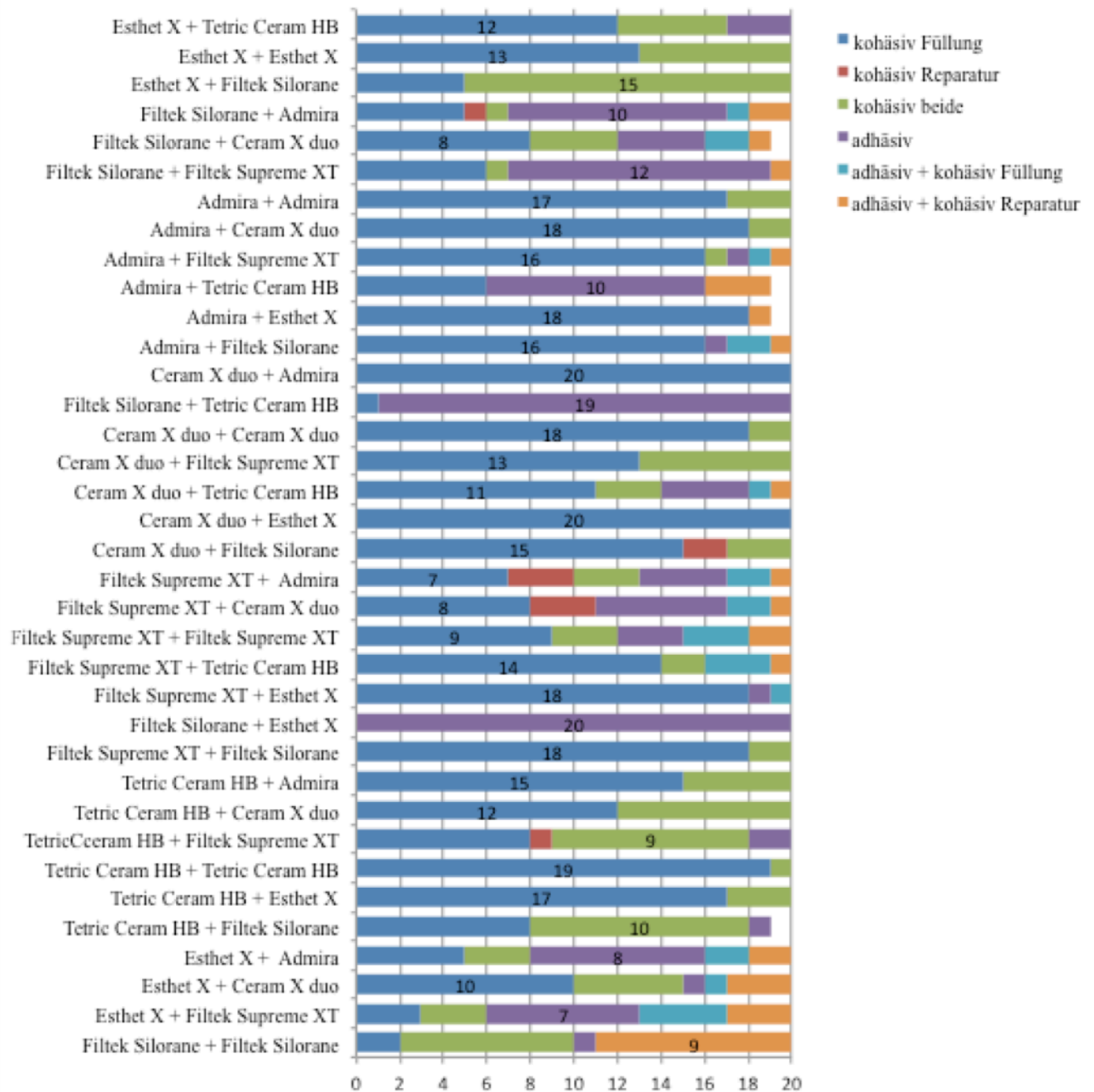


Abbildung 9: Übersicht über das Vorkommen der Hauptbruchart nach Gruppe

Aus der Grafik wird unter anderem ersichtlich, dass die Kombination von Filtek Silorane als Füllungsmaterial mit einem methacrylat-basierten Komposit (Esthet X, Filtek Supreme XT,

Tetric Ceram HB) als Reparaturmaterial zu einer starken Häufung adhäsiver Brüche führt. Auch in der Kombination von Filtek Silorane mit demOrmocer Admira ist ein erhöhtes Auftreten adhäsiver Brüche zu beobachten. Wird Filtek Silorane dagegen als Reparaturmaterial verwendet, lässt sich eine generelle Häufung kohäsiver Brüche in Füllung und Reparatur feststellen. Kohäsive Brüche in Füllung und Reparatur treten zudem besonders im Rahmen der Kombination von Esthet X mit Tetric Ceram HB auf. Die Kombination von Filtek Silorane als Füllungs- und Reparaturmaterial führt zu einem massiven Anstieg der Brüche vom Typ adhäsiv-kohäsiv bei der Reparatur. Das stopfbare Material Tetric Ceram HB als Füllungsmaterial führt zu einer Häufung der Brüche vom Typ kohäsiv (kohäsiv vom Typ 1 oder 2), während adhäsive Brüche am häufigsten bei mikrohybrid-Kompositen auftreten. Wurde Tetric Ceram HB hingegen als Reparaturmaterial verwendet, ist eine Häufung adhäsiver Brüche zu beobachten.

Typischerweise treten adhäsive Brüche bei geringster Festigkeit auf. Auch adhäsiv-kohäsive Brüche werden bei geringer Festigkeit eher beobachtet als kohäsive Brüche. Letztere treten unter Beteiligung der Füllung stets bei höherer Festigkeit auf, als solche unter alleiniger Beteiligung der Reparatur. Dies ist in Abbildung 10 veranschaulicht.

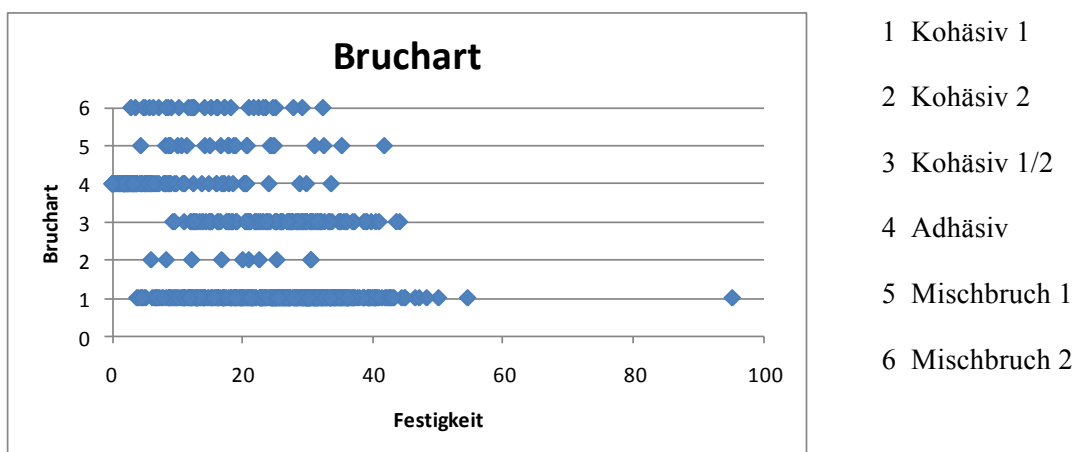


Abbildung 10: Streuung der Verbundfestigkeit in Bezug auf die Art des Bruches

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über Mittelwert und Standardabweichung der Festigkeit für die sechs analysierten Brucharten.

Tabelle 6: Mittelwerte und Standardabweichungen für die Brucharten

Bruchart	Mittelwert	Standardabweichung
kohäsiv Füllung	25,96	10,36
kohäsiv Reparatur	19,27	8,54
kohäsiv beide	25,54	8,06
adhäsiv	6,27	6,80
adhäsiv + kohäsiv Füllung	18,79	9,43
adhäsiv + kohäsiv Reparatur	15,06	8,00

Abschließend gibt Tabelle 7 Aufschluss über die Zuverlässigkeit der ermittelten Werte.

Tabelle 7: Durch Weibull-Statistik ermittelten m-Werte im Überblick

Füllung/Reperatur	Filtek Silorane	Esthet X	Tetric ceram HB	Filtek Supreme XT	Ceram X duo	Admira
Filtek Silorane	1,6	1,09	0,68	1,2	0,88	1,83
Esthet X	7,18	2,81	1,52	1,72	3,13	1,91
Tetric ceram HB	3,15	4,93	2,73	2,16	4,32	6,71
Filtek Supreme XT	6,55	2,6	2,34	3,56	0,84	2,03
Ceram X duo	6,45	3,04	5,53	0,77	2,8	6,09
Admira	8,5	0,71	0,77	4,36	5,67	6,36

Die zuverlässigsten Werte der Materialkombinationen konnten bei Admira und Filtek Silorane ermittelt werden. Betrachtet man die einzelnen Komposite, so zeigt die Weibull-Verteilung, dass Admira als zuverlässigstes Füllungsmaterial und Filtek Silorane als zuverlässigstes Reparaturmaterial angesehen werden kann. Zu erwähnen bleibt hier das Vorkommen einiger Fehlversuche, die folglich in „0-Werten“ der Verbundfestigkeit resultieren und damit die m-Module der betroffenen Gruppen deutlich sinken lässt.

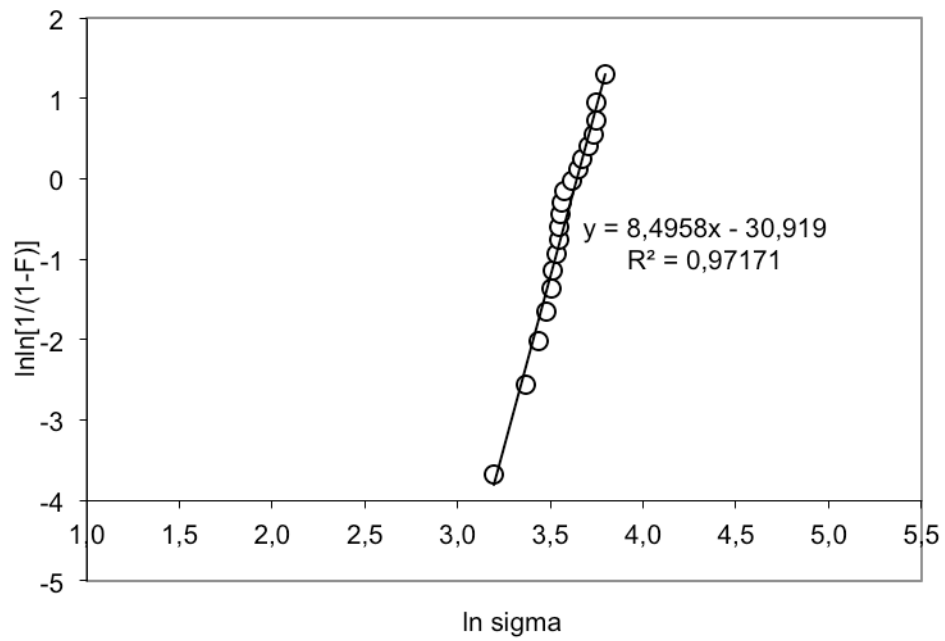


Abbildung 11: Weibull-Verteilung der Kombination von Admira mit Filtek Silorane mit hoher Zuverlässigkeit

5 Diskussion

Die Reparatur von Werkstoffen erhält im Allgemeinen mehr und mehr Aufmerksamkeit in der restaurativen Zahnheilkunde. Der vollständige Ersatz einer defekten Kompositfüllung wird, wie bereits besprochen, als zeitaufwändiger betrachtet und birgt die Gefahr eines erheblichen Verlusts von Zahnhartsubstanz (Kreijci et al. 1995). Dem Rechnung tragend haben sich Kompositfüllungen in Kombination mit der Schmelz-Ätz-Technik als Standardlösung etabliert. Die erzielbaren Haftwerte an Schmelz und Dentin können einen zuverlässigen Verbund gewährleisten. Dennoch bleiben Qualität und Dauerhaftigkeit bei einer Reparatur vorhandener Kompositfüllungen diskutabel. In der vorliegenden Studie wurde das Reparaturverhalten von Kompositfüllungen in Hinblick auf die Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Kompositklassen untersucht.

5.1 Diskussion von Material und Methode

Eine in-vitro-Untersuchung birgt bezüglich ihrer klinischen Aussagekraft Probleme, da sich jeder Werkstoff im intraoralen Milieu anders verhalten kann als unter künstlichen Laborbedingungen. Reproduzierbare und damit klinisch vergleichbare Untersuchungen, bei denen jeder Werkstoff genau denselben Bedingungen unterworfen ist, sind schwer durchführbar. Aus diesem Grund ist man auf die aus Laborversuchen gewonnenen Messwerte angewiesen, die unter möglichst klinikgetreuen Untersuchungsbedingungen erbracht werden sollen. Die Methodik wie auch die Materialauswahl der vorliegenden Studie orientiert sich an den Erkenntnissen zahlreicher Untersuchungen zur Reparatur von Kompositfüllungen (Tezvergil et al. 2003, Ahlers 2006, Papacchini et al. 2007, Yesilyurt et al. 2009, Ivanovas et al. 2010, Lührs et al. 2010).

5.1.1 Verwendete Materialien

Mit der ständigen Weiterentwicklung der vorhandenen Komposite und vor allem mit der Einführung neuer Materialklassen, wie den ormocer- und siloran-basierten Kompositen, steigt der Bedarf an Forschung zur Kompatibilität dieser Werkstoffklassen. Die in dieser Studie verwendeten Kompositmaterialien stellen einen repräsentativen Querschnitt aus der Vielfalt der bekannten Werkstoffe dar. Bei der Auswahl wurden zum einen Unterschiede in den Matrices berücksichtigt und rein methacrylat-basierte Komposite (Esthet X, Tetric ceram HB, Filtek Supreme XT), aber auch ormocer-basierte (Admira, Ceram X Duo) und siloran-basierte Komposite (Filtek Silorane) verwendet. Zum anderen wurden die Komposite anhand ihrer verschiedenen Materialklassen in Hinblick auf ihren Füllkörperanteil verglichen. Hier unterscheidet man die nanohybrid-Komposite (Filtek Supreme XT, Ceram X Duo) von mikrohybrid-Kompositen (Filtek Silorane, Esthet X, Admira) und stopfbaren Kompositen (Tetric ceram HB). Die Eigenschaften der mikro- und nanohybrid-Komposite werden als tendenziell ähnlich hinsichtlich ihrer Biegefestigkeit und ihrem Elastizitätsmodul eingestuft. Während manche Autoren eine verminderte Stabilität der nanohybrid-Komposite gegenüber den mikrohybrid-Kompositen bei Lagerung in Wasser zeigen konnten (Ilie 2009), hat *Hahnel* eine sehr ähnliche Anfälligkeit hinsichtlich der Alterung festgestellt (Hahnel et al. 2010). Beide Materialgruppen werden jedoch als Universal-Komposite bezeichnet, die für alle Belastungsbereiche in der Mundhöhle benutzt werden können (Ferrance et al. 2010). Die hochviskösen, stopfbaren Komposite wurden mit der Intention entwickelt, das Verschleiß- und Bruchverhalten zu verbessern und die Polymerisationsschrumpfung, sowie die Sensitivität bei der Verarbeitung, vor allem bei der Gestaltung von Approximalkontakten, zu verringern. In unterschiedlichen Arbeiten konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede der mechanischen Eigenschaften zwischen den stopfbaren und den nicht stopfbaren Kompositen festgestellt werden (Ilie 2009, Choi et al. 2000). Auch die

Polymerisationschrumpfung der stopfbaren Komposite wird als vergleichbar zu vorhandenen nicht-stopfbaren Kompositen betrachtet (Choi et al. 2000).

Vor allem für die Gruppe der siloran-basierten Komposite, mit einer reduzierten Volumenschrumpfung von etwa einem Prozent (Weinmann 2005), werden derzeit viele Studien hinsichtlich mechanischem Verhalten und Reparaturfähigkeit durchgeführt (Ivanovas et al. 2010, Ilie 2009, Lührs et al. 2010). Auch die ‚organically modified ceramics‘ (Ormocere) wurden entwickelt, um die Polymerisationschrumpfung zu vermindern. Sie erwiesen sich als ein Material mit verringertem Verschleißverhalten (Yap et al. 2004) und Schrumpfungsverhalten, vergleichbar mit den Hybridkompositen (Cattani-Lorente et al. 2001).

Insgesamt beschäftigen sich derzeit nur wenige Autoren mit der Frage nach Kombinationsmöglichkeiten der Komposite bei der Reparatur. Im Praxisalltag wirft jedoch gerade dieser Themenkomplex Probleme auf, nämlich dann, wenn dem Behandelnden das verwendete Substrat-Komposit unbekannt ist. Ein sehr grundlegender Gedanke dieser Studie war es, den klinischen Verhältnissen möglichst nahe zu kommen. Alle Komposite wurden demnach nach dem gleichen Verfahren vorbehandelt und repariert, um vergleichbare Ergebnisse im Bezug auf die Verbundfestigkeiten der verschiedenen Komposite zu erhalten.

5.1.2 Alterung der Prüfkörper

Der Grund für das Altern der Prüfkörper ist, den natürlichen Alterungsprozess in der Mundhöhle, wie die Reduzierung der Anzahl nicht umgesetzter Methacrylatgruppen, die Absorption von Wasser und die Auswaschung von Komponenten, nachzuahmen. Für diesen Prozess gibt es kein Standardprotokoll, so dass verschiedene Studien auf unterschiedliche Verfahren zurückgreifen. In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Schwerpunkt auf den

Aspekt der Alterung gelegt, so dass nicht nur die Füllung oder nur der gesamte Prüfkörper eine Alterung erfuhr, sondern sowohl die Füllung als auch der Verbund des Substrats mit der Reparaturfüllung ausgiebig gealtert wurde. Generell beschleunigt künstliche Alterung den Abbau des Komposits, was zu einer signifikanten Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt (Ferrance et al. 1998). Eine Wasserlagerung bei 37°C simuliert das durchschnittliche Mundhöhlenmilieu, wenn keine unterschiedlich temperierten Speisen und Getränke aufgenommen werden. Durch diese Stimulation wird den hygroscopischen Komponenten der Prüfkörper die Möglichkeit der Wassereinlagerung und damit verbundenen Veränderung ihrer Eigenschaften gegeben.

Ziel des Thermowechselbades ist es, die thermische Belastung der Verbundfläche durch den Flüssigkeitseinfluss und die Temperaturwechsel darzustellen, wofür Temperaturwechsel von 5°C auf 55°C gewählt wurden. Der Temperaturbereich bietet Sicherheitsreserven, da bei Nahrungstemperaturen, die in vivo zwischen -7°C und +75°C liegen, in einer Tiefe von 0,5 Millimetern im Zahnschmelz lediglich Temperaturen von 16°C bis 43°C gemessen wurden (Kappert, Schüren 1996). Die Temperaturwechsel fanden konstant alle 30 Sekunden statt, wodurch ein thermischer Ermüdungsprozess an der Verbundfläche zwischen erster Füllungsschicht und Reparaturfüllung erzielt wurde. Außerdem führen wiederholte Temperaturwechsel zu einer kontinuierlichen Schwächung der Verbundflächen zwischen Kunststoffmatrix und Füllstoffen (Rinastiti et al. 2010), was höchstwahrscheinlich auf deren unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten zurückzuführen ist (Hahnel et al. 2010). *Rinastiti et al.* fassten in einer neueren Studie zusammen, dass Lagerung in Wasser und auch thermische Belastung durch Thermowechselbäder signifikanten Einfluss auf die Verbundfestigkeit nehmen (Rinastiti et al. 2010). Genauere Einflüsse der Alterungsmedien und -zeiten lassen sich bei verschiedenen Autoren finden (Hahnel et al. 2010, Papacchini et al. 2007, Moser et al. 2009, Brendeke et al. 2007). Als Alterungsmedien stehen vor allem destilliertes Wasser, künstlicher Speichel, Zitronensäure und Ethanol zur Verfügung. Wasser

wird aufgrund von Wasserabsorption, hydrolytischen Prozessen und Freisetzung von Füllstoffpartikeln als sehr beeinflussendes Medium für die Kompositoberfläche angesehen (Cattani-Lorente et al. 1999). Im Rahmen mehrerer Studien wurden Verbundfestigkeiten der Füllungsreparatur nach künstlicher Alterung untersucht ohne dass man allerdings auf einen gemeinsamen Nenner kam, welches der zur Verfügung stehenden Medien das klinisch relevanteste sei (Padipatvuthikul et al. 2007). Zwar konnte *Ivanovas et al.* keinen signifikanten Unterschied von Verbundfestigkeiten feststellen, wenn Prüfkörper statt einem Monat nur für eine Woche gealtert wurden (Ivanovas et al. 2010). *Hahnel* kam jedoch in seiner Studie zum künstlichen Altern von Dentalkompositen zu dem Ergebnis, dass die Dauer der Alterung einen wesentlich stärkeren Einfluss auf verschiedene mechanische Eigenschaften hat als das Medium, mit dem gealtert wird. Alterung für 90 oder 365 Tage mit Thermowechselbad-Belastungen führten hier zu signifikant schlechteren mechanischen Eigenschaften als eine künstliche Alterung für nur sieben Tage (Hahnel et al. 2010). Zusätzlich zeigte *Hahnel* in seinen Ergebnissen, dass unterschiedliche Komposite nicht gleichermaßen von der Alterung beeinflusst werden (Hahnel et al. 2010). Silorane weisen beispielsweise eine geringere Wasserabsorption als rein methacrylat-basierte oder ormocer-basierte Komposite auf, was auf ihr hydrophobes Siloxangerüst zurückzuführen ist (Weinmann et al. 2005). Das Alterungsprotokoll der vorliegenden Studie erhält eine zusätzliche klinische Relevanz durch *Brendeke et al.*, die in ihrer Studie zeigten, dass eine zweimonatige Alterung in Wasser mit deutlich niedrigeren Verbundfestigkeiten korreliert als eine einwöchige Alterung in Wasser oder Säure (Brendeke et al. 2007).

5.1.3 Oberflächenbehandlung und –konditionierung

Die Reparatur defekter Kompositfüllungen wird durch Schichtung neuen Komposits auf das bestehende Material erreicht (Inoue 1978). Die Verbundfestigkeit zwischen Komposit-

Substrat und Reparaturkomposit ist dabei, wie eingangs erläutert, eines der größten Probleme, die in der Praxis auftreten (Gordon et al. 2003). In der Forschung erfährt sie entsprechende Kontroversen, aus welchen die vorliegende Studie den bestmöglichen Schluss zu ziehen versuchte.

Eine direkte Schichtung neuen Komposits auf eine angeraute, gealterte Substratoberfläche wird generell nicht empfohlen (Brosh et al. 1997, Papacchini et al. 2007), da die verringerte Ausbildung kovalenter Bindungen beziehungsweise, bei den Siloranen die herabgesetzte Reaktivität des gealterten Komposits, die unvollständige Penetration des neuen Komposits in oberflächliche Vertiefungen die Adhäsion beeinträchtigen (Papacchini et al. 2007, Shen et al. 2004).

Unter den verschiedenen Methoden der Oberflächenbehandlung zur Optimierung des Verbunds bei Kompositreparaturen wird die Adhäsiv-Technik im Allgemeinen als besonders komplexes Gebiet der Zahnheilkunde betrachtet. Jüngere Veröffentlichungen zur Optimierung der Verbundfestigkeiten durch Oberflächenbehandlung und –konditionierung legen das Hauptinteresse auf die Oberflächenvorbehandlung des Komposit-Substrats, den Ätzzvorgang, die Silanisierung und die Applikation verschiedener Adhäsivsysteme (Papacchini et al. 2007, Frankenberger et al. 2003, Rathke et al. 2008, Tezvergil et al. 2003, Yesilyurt et al. 2009, Padipatvuthikul et al. 2007). Sowohl das Anrauen der Substratoberfläche mit Karbid-Bohrern, als auch das Sandstrahlen wurden als vielversprechende Methoden angesehen, um einen zuverlässigen Verbund von alter zu neuer Kompositfläche zu erlangen (Swift, LeValley & Boyer 1992). *Rathke et al.* konzentrierten sich in ihrer Untersuchung vor allem auf mechanische Oberflächenbehandlungen, die leichter in der täglichen Praxis eingesetzt werden können. *Rathke* stellte in einer neueren Studie von 2008 fest, dass eine alleinige Applikation eines Bonding-Systems keine Nachteile gegenüber dem komplizierteren Prozess der Silikatisierung und Silanisierung hat (Rathke et al. 2008).

Damit steht er der Untersuchung *Rinastitis et al.* entgegen, in welcher diese eine höhere Verbundfestigkeit durch Oberflächenbehandlung mit einer Silikat-Beschichtung gefolgt von Silanisierung und zusätzlicher Verwendung eines Bonding-Systems erzielten (Rinastiti et al. 2010).

Magni et al. zeigten, dass Haftvermittlersysteme einen weitaus bedeutenderen Faktor als die Vorbehandlung der Substratoberfläche darstellen, wogegen *Junior et al.* in ihrer Studie feststellten, dass das Anrauen der Oberfläche durch Sandstrahlen die Verbundfestigkeit unabhängig der Verwendung eines Primers (Silan und/oder Adhesiv-System) erhöht (Magni et al. 2011, Junior et al. 2008). Auch *Papacchini et al.* untersuchte die Oberflächenbehandlung bei Komposit-Reparaturen und stellte fest, dass Sandstrahlen mit 50 µm Aluminiumoxid-Partikeln einen zuverlässigen Verbund unterstützt (Papacchini et al. 2006). Es wird deutlich, dass die Einflussfaktoren zur Erhöhung der Verbundfestigkeit in der aktuellen Forschung unterschiedlich gewertet werden.

Ein grundlegendes Ziel der vorliegenden Studie war es, eine klinische Situation bestmöglich zu simulieren, um klinische Leitfäden an die Praxis geben zu können. Die intraorale Verwendung bestimmter Medien, wie beispielsweise das Ätzen mit Flusssäure oder der Gebrauch eines Sandstrahlgeräts, können schädliche Folgen an Schleimhäuten oder Zähnen hinterlassen, so dass hier, stützend auf Testergebnisse von *Maneenut* und *Ivanovas*, statt mit einem Sandstrahlgerät oder Karbid-Bohren zu arbeiten, lediglich 80-Grit Schleifpapier für die Oberflächenvorbehandlung der Prüfkörper verwendet wurde (Maneenut et al. 2010, Ivanovas et al. 2010). Eine erst kürzlich veröffentlichte Studie von *Loomans et al.* beschäftigte sich mit Reparaturmethoden unterschiedlicher, gealterter Komposite und resümierte, dass es derzeit keine Universalmethode zur Reparatur von Kompositen gibt, aber Ätzen mit Phosphorsäure, Sandstrahlen mit CoJetTM und Ätzen mit 9,6 prozentiger Flusssäure für 120 Sekunden für alle verwendeten Komposite (Clearfil AP-X, Clearfil Photo Posterior, Photo Clearfil Bright,

Kuraray, Osaka, Japan; Heliomolar, Ivoclar Vivadent, Schaan, Lichtenstein; Filtek Supreme XT, 3M ESPE, Seefeld, Deutschland) die höchsten Reparaturwerte erzielen konnte (Loomans et al. 2011). Studien von *Magni et al.* und *Papacchini et al.* konnten keinen signifikanten Einfluss einer Ozongas-Behandlung der Substratoberfläche vor einem Reparaturverfahren zeigen. Beispielsweise hat eine Desinfektion mit Ozongas folglich keinen Einfluss auf die Verbundfestigkeit bei der Reparatur von Kompositen (Magni et al. 2011, Papacchini et al. 2006).

Frankenberger et al. erreichten eine signifikant bessere Randqualität nach Verwendung einer zusätzlichen, dünnen Schicht eines niedrig-viskösen Komposites zum Adhäsiv-System (Frankenberger et al. 2003), wogegen *Papacchini et al.* höhere Verbundfestigkeiten mit der alleinigen Applikation eines „flowable“ Komposites erreichten (Papacchini et al. 2008).

In einer neuen Studie von *Ivanovas* wurde das Reparaturverhalten von siloran- und methacrylat-basierten Kompositen untersucht. Verbundfestigkeiten mit verschiedenen Haftvermittlern wurden getestet. Die Studie schloss durch ihre Ergebnisse auf die Tatsache, dass ‚flowables‘ als Zwischen-Agentien zu akzeptablen Ergebnissen führen, wenn sie der chemischen Zusammensetzung des zu reparierenden Komposits entsprechen. Die Reparatur von methacrylat-basierten mit methacrylat-basierten Kompositen mit Tetric Evo Flow führte bei *Ivanovas* zu vergleichbaren Ergebnissen wie die Reparatur von siloran-basiertem und siloran-basiertem Komposit mit Hermes Flow, einem siloran-basierten niedrigviskösen Komposit. Dagegen zeigten siloran-basierte ‚flowables‘ zwischen einem siloran-basierten und einem methacrylat-basierten Komposit drastisch verringerte Verbundfestigkeiten (Ivanovas et al. 2010). Aus diesen Testergebnissen und *Ivanova's* Aussage lässt sich die Empfehlung ableiten, für die Kombination von Methacrylaten und Siloranen ein dimethacrylat-basiertes Adhäsivsystem, das eine Silan-Komponente enthält, zu verwenden. Diese Erkenntnis gewinnt zusätzlich Relevanz, wenn es für den behandelnden Zahnarzt nicht möglich ist, den

vorhandenen Komposit oder dessen Matrix klinisch zu bestimmen. Einige Studien belegten eine Zunahme der Verbundfestigkeit zwischen siloran-basierten und methacrylat-basierten Kompositen, wenn ein phosphat-dimethacrylat basierendes Adhäsiv-System bei der Reparatur verwendet wurde (Tezvergil et al. 2003, Moser et al. 2009, Ivanovas et al. 2010). Auch *Maneenut* unterstützt die Aussage von *Ivanovas* und *Tezvergil*, indem er in seiner neueren Studie zeigte, dass Clearfil Repair ein universelles Reparatursystem ist, das bei jeder Art von Komposit-Reparatur Verwendung finden kann (Maneenut et al. 2010). Das Reparatur Kit Clearfil Repair ist ein Phosphat-dimethacrylat-basiertes Adhäsivsystem, das zusätzlich eine Silan-Komponente enthält, welche die Benetzbarkeit der Substratoberfläche erhöht und eine chemische (Siloxan-) Bindung zu den anorganischen Füllstoffen bewirkt (Tezvergil et al. 2003, Brendeke et al. 2007). Wenn man den Verbund von methacrylat-basierten zu siloran-basierten Kompositen betrachtet, vermuten *Tezveril-Mutluay et al.*, dass der Phosphatrest mit dem Oxiranrest des Siloranes und die Acrylatgruppe mit dem Methacrylat reagieren (Tezveril-Mutluay et al., 2008). Clearfil Repair erzeugt außerdem eine etwas dickere Adhäsiv-Schicht als beispielsweise Prime&Bond NT (Dentsply), was einen elastischen Verbund vom neuen zum alten Komposit unterstützt und damit die Grenzflächen-Qualität und die Verbundfestigkeit verbessert (Yesilyurt et al. 2009).

Stützend auf den Studien von *Ivanovas*, *Tezvergil*, *Maneenut* und *Yesilyurt* wurde in der vorliegenden Studie, in der es von Bedeutung war, ein einheitliches und zuverlässiges System zu wählen, das einen direkten Vergleich der Ergebnisse der Verbundfestigkeiten zwischen allen verwendeten Kompositen erlaubt, Clearfil Repair gewählt. Die Vorbehandlung so wie auch die Konditionierung der Substratoberflächen war bei allen Prüfkörpern dieser Studie analog.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Die ermittelten Werte dieser Versuchsreihe zeigen, dass durchaus Unterschiede in den Verbundfestigkeiten der verschiedenen Materialkombinationen bestehen. Die Mittelwerte der 36 möglichen Kombinationen geben einen Überblick über die erreichten Verbundfestigkeiten. Die höchsten Festigkeiten wurden, wie im Ergebnisteil bereits erwähnt, durch die Kombinationen von Admira als Füllmaterial mit Filtek Silorane als Reparaturmaterial, Admira als Füllmaterial mit Admira als Reparaturmaterial und durch Tetric ceram HB als Füllmaterial mit Esthet X als Reparaturmaterial erzielt. Hingegen konnte durch die Kombinationen von Filtek Silorane (Füllung) mit den methacrylat-basierten Kompositen Tetric Ceram HB (Reparatur), Esthet X (Reparatur) und Filtek Supreme XT (Reparatur) nur eine sehr geringe Festigkeit erreicht werden.

Betrachtet man die Verbundfestigkeiten bezogen auf ein ideales Reparaturmaterial, so kann man bei Filtek Silorane die zuverlässigsten Werte identifizieren. Einen Mindestwert für die Verbundfestigkeiten nach einer Reparatur ist schwer zu bestimmen, jedoch wird in der Literatur von einem Richtwert ausgegangen, der zwischen 18 und 20 Megapascal liegt (Puckett et al. 1991). Dementsprechend kann Filtek Silorane als ideales Reparaturmaterial in Kombination mit den getesteten Materialien gewertet werden. Ausgenommen davon ist lediglich die Kombination mit Filtek Silorane selbst, die den genannten Richtwert minimal unterschreitet. Man könnte vermuten, dass das ansonsten optimale Abschneiden dieses Materials für eine Reparaturfüllung, einerseits auf dessen vergleichsweise geringer Polymerisationsschrumpfung beruht, mit der eine geringe Spaltbildung zum Substratkomposit beziehungsweise zur Haftvermittlerschicht erzielt werden konnte. Damit würde bei Filtek Silorane eventuell eine Fläche bestehen, die weniger fehlerbelastet ist und so größere Verbundfestigkeiten im Vergleich zu nicht siloran-basierten Kompositen als Reparaturmaterial erreicht werden können. Andererseits könnte das hydrophobe Verhalten der

siloran-basierten Komposite eine Rolle spielen. Gerade bei einer ausgiebigen künstlichen Alterung erfahren die Komposite Degradationsprozesse, die unter anderem eine vermehrte Wasseraufnahme und damit eine Verschlechterung des Gefüges bedingen. Wie bereits erwähnt, besitzen Silorane durch den stark hydrophoben Siloxan-Baustein eine stärkere Hydrophobizität als methacrylat-basierte Komposite (Weinmann et al. 2005). Wasserresorption und Löslichkeit sind verringert (Palin et al. 2005), was erwarten lässt, dass die Änderung der Materialeigenschaften bei Lagerung geringer ausfällt. Die Silorane zeigten dort vergleichbare mechanische Eigenschaften zu den bewährten methacrylat-basierten Kompositen nach Lagerung und erwiesen sich sogar als stabiler bei Lagerung in Alkohol und bei zusätzlicher Thermowechselbelastung. Da in vorliegender Untersuchung der Verbund einer zusätzlichen Thermowechselbelastung ausgesetzt wurde, könnten die ermittelten Werte so erklärt werden, dass sich bei Filtek Silorane als Reparaturmaterial und als Materialklasse, welche unempfindlicher gegenüber diesen thermischen Prozessen ist, ein Verbund zum Substrat als zuverlässiger darstellt als bei den übrigen getesteten Materialien. Die hohe Zuverlässigkeit von Filtek Silorane als Reparaturmaterial konnte durch die Weibull-Statistik bestätigt werden.

Auch Esthet X erreichte in vorliegender Studie gute Werte als Reparaturmaterial. Esthet X ist ein mikrohybrid-Komposit, welches kein UDMA enthält. Die Ergebnisse könnten, wie bei Filtek Silorane, durch eine geringere Wasserabsorption und die dadurch bedingte gute Stabilität bei Lagerung, beziehungsweise bei künstlicher Alterung, Erklärung finden. Die geringe Löslichkeit von Kompositen auf UDMA-Basis wurde auch von *Pearson & Longman* beschrieben (Pearson und Longman 1989).

Wie bereits erwähnt, konnte Admira als Vertreter der ormocer-basierten Komposite die höchsten Mittelwerte als Substratmaterial zugeordnet werden. Zu Füllungsreparaturen mit ormocer-basierten Kompositen besteht außer der Studie von *Magni et al.* (Magni 2011)

Mangel an Literatur, sodass ein Vergleich zu anderen Studien an dieser Stelle äußerst schwierig ist. *Maxkors* gibt einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten für diese Materialklasse an und *Hahnel et al.* zeigte in seiner Studie nach künstlicher Alterung für ein ormocer-basiertes Komposit die höchsten Werte für Vickers-Härte (Hahnel et al. 2010). *Tagtekin* verglich *Admira* mit einem konventionellen Hybridkomposit und stellte in seinen Untersuchungen bei *Admira* die höchste Oberflächenrauigkeit, die größte Härte und Verschleißfestigkeit im Vergleich zu einem Mikrohybrid-Komposit (*Amelogen*, *Ultradent*) fest, jedoch nur nach 24 Stunden künstlicher Alterung (Tagtekin et al. 2004). Gerade das gute Verschleißverhalten, der hohe Festigkeitswert, aber auch die stärkere Oberflächenrauigkeit könnte die Feststellung dieser Studie, *Admira* als zuverlässiges Substratmaterial verwenden zu können, unterstützen.

Die Mittelwerte der Füllungs- und Reparaturmaterialien *Admira* und *Ceram X Duo* unterschieden sich nicht signifikant. Es zeigten sich nahezu identische Werte für Kombinationen dieser Materialien mit allen verwendeten Materialien. Laut Herstellerangabe fällt auch *Ceram X Duo* unter die Matrixgruppe der ormocer-basierten Komposite, trotz etwas anderer Matrixzusammensetzung. Die beiden Materialien enthalten die gleichen Füllstoffe (Ba-Al-B-Si-Glas, SiO₂), jedoch leicht differierende Volumen- und Gewichtsprozente. Aus diesem Fakt lässt sich folgern, dass die Füllkörper eine entscheidende Rolle bei der Reparatur von Kompositen spielen. Die Vermutung liegt nahe, dass das hier verwendete Reparaturset *Clearfil Repair* mit seiner Silan-Komponente den Füllkörperverbund zwischen Substrat und Reparaturkomposit und nicht den Verbund von Matrix zu Matrix unterstützt (Ivanovas et al. 2010). *Esthet X* ergab in der vorliegenden Untersuchungsreihe trotz ähnlicher Füllkörper teilweise signifikant unterschiedliche Verbundfestigkeiten, was auf den höheren Füllkörperanteil dieses Materials im Gegensatz zu *Ceram X* und *Admira* zurückzuführen sein könnte.

Ein wichtiges Ziel dieser Studie war es, die Verbundfestigkeit identischer Materialien mit der Verbundfestigkeit nicht-identischer Materialien zu vergleichen, also der Frage nachzugehen, inwiefern Gleiches mit Gleichem repariert werden kann. Die Ergebnisse zeigen, dass bei allen Materialien, ausgenommen Tetric ceram HB, die mit identischem Komposit kombiniert wurden, die Verbundfestigkeiten den höchsten oder einen vergleichsweise hohen Wert erreichen konnten. Der Effekt auf die Verbundfestigkeit hierbei ist signifikant, aber sehr gering. Dies bedeutet, dass im Allgemeinen eine Kombination identischer Materialien durchaus sinnvoll ist, jedoch nicht zwangsläufig geschehen muss. Eine mögliche Begründung für das schlechtere Abschneiden der homologen Reparatur von Tetric ceram HB, als Vertreter der hochgefüllten Komposite, könnte in der schlechteren Benetzbarkeit des höher gefüllten Komposits liegen. Auffallend hierbei ist, dass Tetric Ceram HB als Füllmaterial allgemein besser abschneidet als in der Funktion des Reparaturmaterials.

Moser untersuchte in einer Studie das Reparaturverhalten siloran-basierter Komposite und konnte zeigen, dass deren Verbundfestigkeit gleich gut war wie die der methacrylat-basierten Komposite, wenn Füllung und Reparaturmaterial aus dem gleichen Material bestanden. Bei der Reparatur siloran-basierter mit methacrylat-basierter Komposite erhielt *Moser* niedrigere Festigkeitswerte, allerdings waren die Kombinationen statistisch vergleichbar, wenn ein silan-basierter Haftvermittler (Clearfil Repair) angewendet wurde (*Moser et al.* 2009). Die Studie von *Chan* und *Boyer* konnte, wie bereits erwähnt, zeigen, dass die Kombination verschiedener Materialien im Vergleich zu homolog reparierten Prüfkörpern grundsätzlich geringere Scherfestigkeiten ergibt (*Chan, Boyer* 1983). Dagegen berichteten weitere Untersuchungen, dass die Verwendung eines Reparatur-Komposits, mit der gleichen Matrix wie der des zu reparierenden Substrats, generell keine signifikant größeren Verbundfestigkeiten aufweist (*Shadad, Kennedy* 1998, *Gregory* 1990). Auch die aktuelle Studie von *Ivanovas* bekräftigt dies, indem gezeigt wurde, dass eine erfolgreiche Reparatur mit der Kombination von methacrylat- und siloran-basierten Kompositen möglich ist (*Ivanovas et al.* 2010).

Betrachtet man die möglichen Einflussfaktoren auf die Verbundfestigkeit der Füllungsreparatur, wird deutlich, dass das Material der Füllung und die Materialgruppe den größten Einfluss besitzen. Mit Materialgruppe ist hier die bereits erwähnte Unterscheidung in methacrylat-, siloran- und ormocer-basierte Komposite gemeint. Sieht man vom generellen Einfluss des Materialtyps ab, also von der Unterscheidung mikrohybrid, nanohybrid oder stopfbarer Komposit, scheint generell die Verbundfestigkeit stärker davon abzuhängen, welches Material als Füllung verwendet wird, als davon, welches als Reparaturkomposit gewählt wurde. Für die Praxis ist diese Erkenntnis deshalb relevant, weil es vielen behandelnden Zahnärzten nicht möglich ist, das vorhandene Material der zu reparierenden Füllung zu identifizieren. Die Tatsache, dass das Reparaturkomposit eine untergeordnete Rolle für die Verbundfestigkeit spielt, minimiert das Risiko einer, durch ‚falsches‘ Material hervorgerufenen geringeren Verbundfestigkeit der Füllungsreparatur bei unbekanntem Substrat.

Die Größe der Füllkörper nahm in der Weiterentwicklung der Komposite kontinuierlich ab, um verbesserte Ästhetik und Polierbarkeit zu erreichen. In dieser Studie wurden zwei Nanohybride (Filtek Supreme XT, Ceram X Duo) verwendet. Es wurde bereits gezeigt, dass die größere Oberfläche der Füllkörper in diesen Kompositen tendenziell dazu neigt, mehr Wasser aufzunehmen und der Füllstoff-Matrix-Verbund schneller degradiert, was die mechanischen Eigenschaften letztlich, verglichen mit den Mikrohybrid-Kompositen stärker beeinflusst (Curtis et al. 2009). Diese These stimmt mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung nicht überein. Die Mittelwerte der Festigkeiten der Nanohybride sind vergleichbar mit den Gruppen der Mikrohybride und der stopfbaren Komposite. Der Materialtyp der Füllung - mikrohybrid, nanohybrid oder stopfbar - besitzt hier am wenigsten Einfluss auf die Verbundfestigkeit.

Stopfbare Komposite wurden entwickelt, um die Polymerisationsschrumpfung zu reduzieren, die Frakturanfälligkeit zu minimieren und die Verarbeitung während des Legens einer Füllung zu erleichtern. Bezüglich der Verbundfestigkeiten zeigte Tetric ceram HB weder als Füllmaterial noch als Reparaturmaterial hervorzuhebende Vorteile gegenüber den Hybridkompositen.

Boyer und *Chan* verglichen in ihrer Studie im Jahr 1984 hochgefüllte mit niedriger gefüllten methacrylat-basierten Kompositen und kamen zu dem Ergebnis, dass die höher gefüllten Komposite im Schnitt höhere Scherfestigkeiten erreichten. *Boyer* erklärte dies durch einen höheren Elastizitätsmodul (E-Modul) der hochgefüllten Komposite, welches eine bessere Verteilung der Spannung an der Reparaturfuge ermöglicht. Auch andere Untersuchungen konnten bessere Scherfestigkeiten bei Füllungsreparaturen feststellen, wenn hochgefüllte Hybridkomposite anstelle niedriger gefüllter getestet wurden (Eliades und Caputo, 1989). Der E-Modul ist ein Maß für den Widerstand eines Materials gegenüber elastischer Verformung. Materialien mit kleinem E-Modul haben eine geringe Steifigkeit und geben bei Belastung stärker nach (Maxkors, Meiners 2005). Der E-Modul wird durch den Füllkörperanteil beeinflusst. Mit steigendem Füllstoffgehalt nehmen sowohl der E-Modul als auch die Biegefestigkeit zu, was eine erhöhte Formstabilität zur Folge hat (Rodrigues et al. 2008). Ohne die Zugehörigkeit verschiedener Komposite zu ihrer Materialgruppe zu berücksichtigen, konnten Ilie und Hickel eine Zunahme des Elastizitätsmoduls bei Anstieg der enthaltenen Gewichtsprozent beobachten (Ilie, Hickel 2009). In der vorliegenden Studie hat die Volumenprozentzahl des Füllungsmaterials Einfluss auf die Verbundfestigkeit zwischen altem und neuem Komposit. Es konnte aber gezeigt werden, dass zwischen Volumenprozent der Füllung und der Verbundfestigkeit nur ein äußerst schwacher linearer Einfluss besteht, während die Volumenprozentzahl des Reparaturmaterials einen schwach negativen Einfluss auf die Festigkeit besitzt. So konnte Tertric ceram HB mit 63 Volumenprozent und einem sehr hohen E-Modul in dieser Studie im Mittelwert als schlechtestes Reparaturmaterial

bewertet werden. Auf die Verbundfestigkeit hat der Füllkörperanteil der Komposite in Gewichtsprozent einen verhältnismäßig geringeren Einfluss als selbiger in Volumenprozent. Andere Untersuchungen zur Reparatur von Kompositen erläuterten schon die Unterteilung der Bruchmuster in adhäsive, kohäsive und Mischbrüche (Papacchini et al. 2007, Ivanovas et al. 2010). Auffällig an der Verteilung der Bruchmodi ist zunächst die generelle Häufung kohäsiver Brüche der Füllungsreparaturen. Vor allem bei Filtek Silorane als Reparaturmaterial mit den größten Verbundfestigkeitswerten, ist die Häufigkeit kohäsiver Brüche in Füllung und Reparatur deutlich erhöht. Wird jedoch eine Füllung aus Filtek Silorane kombiniert mit den methacrylat-basierten Kompositen Esthet X, Filtek Supreme XT oder Tetric Ceram HB als Reparaturmaterial, so treten stark gehäuft adhäsive Brüche auf. Kohäsive Brüche, bei denen die Bruchfläche innerhalb des Komposits und nicht wie bei adhäsiven Brüchen innerhalb der Verbundfläche liegt, zeigen, dass das Füllungsmaterial selbst mit seinen mechanischen und physikalischen Eigenschaften die Schwachstelle im Haftverbund darstellt, dagegen der Verbund zwischen Substrat und Füllungskomposit zuverlässig zu sein scheint (Oilo 1993). Bei den adhäsiven Bruchmustern kann eine schlechte Benetzbarkeit, die chemische Zusammensetzung des Haftvermittlersystem oder eventuelles Auftreten von technischen Fehlern wie Mikro-Bläschen ausschlaggebend für den schlechteren Haftverbund sein.

Den Zusammenhang zwischen Verbundfestigkeit und den verschiedenen Bruchmodi machte schon *Padipatvuthikul* in seiner Studie deutlich, in der er geringe Verbundfestigkeiten mit adhäsiven Bruchmustern in Verbindung brachte. Seine Studie besagt, dass das Substratkomposit nur frakturieren kann, wenn eine hohe Verbundfestigkeit zum Reparaturkomposit vorhanden ist (Padipatvuthikul et al. 2007). Zu gleichem Ergebnis kommt auch die vorliegende Studie. Typischerweise treten adhäsive Brüche bei geringster Festigkeit auf. Auch adhäsiv-kohäsive Brüche (Mischbrüche) werden bei geringerer Verbundfestigkeit beobachtet als kohäsive Brüche, wobei kohäsive Brüche unter Beteiligung der Füllung stets

bei höherer Festigkeit auftreten als solche unter ausschließlicher Beteiligung der Reparatur. Wenn eine Füllungsreparatur kohäsiv im Substrat bricht, kann man davon ausgehen, dass die Reparatur den okklusalen Belastungen Stand halten kann (Lucena-Martin et al. 2001). Dies entspricht den Ergebnissen dieser Studie, da für die kohäsiven Füllungsbrüche im Schnitt die höchsten Mittelwerte ermittelt wurden.

6 Schlussfolgerungen

- Generell hängt die Verbundfestigkeit stärker davon ab, welches Material als Substrat verwendet wurde, als davon, welches als Reparaturmaterial gewählt wurde. Diese Tatsache lässt klinisch gesehen schwer einen Erfolg der Reparatur prognostizieren, da das verwendete Substrat dem Behandelnden selten bekannt ist.
- Es bestehen teilweise signifikante Unterschiede in den gemessenen Verbundfestigkeiten bei verschiedenen Materialkombinationen: Kombinationen von Füllungsmaterialien unterschiedlicher Matrices sind möglich, jedoch besitzt das Material selbst mit dem zugehörigen Volumenprozentwert den größeren Einfluss auf die Verbundfestigkeit.
- Homolog reparierte Materialien ergeben bei allen Kombinationen zuverlässige Verbundfestigkeiten.
- Admira konnte als Substratmaterial mit den höchsten Mittelwerten und Filtek Silorane als Reparaturmaterial mit den höchsten Mittelwerten identifiziert werden.
- Eine große Rolle zum Verbund der Materialien scheinen die enthaltenen Füllkörper dann zu spielen, wenn ein Haftvermittlersystem mit einer Silan Komponente verwendet wurde.
- Mit Zunahme der Verbundfestigkeit steigt die Anzahl an kohäsiven Frakturmustern.

7 Zusammenfassung

Die konservierende Zahnheilkunde wird im Bereich der Füllungstherapie seit Jahrzehnten mehr und mehr von der Durchführung direkter Kompositfüllungen geprägt. In den letzten Jahren sind nicht nur zahlreiche Füllungsmaterialien und Materialtypen mit verbesserten ästhetischen und materialtechnischen Eigenschaften auf den Markt gekommen, sondern auch die Orientierung hin zu minimalinvasiveren Ansätzen bekommt mehr und mehr Aufmerksamkeit. Eine ökonomisch und behandlungsstrategisch vorteilhafte Alternative zum kompletten Ersatz einer Füllung stellt die Füllungsreparatur dar. Nach zahlreichen Studien, die sich mit der Methodik des Reparaturvorgangs befassten, wurde die Frage interessant, ob und inwieweit die mittlerweile sehr differierenden Füllungswerkstoffe miteinander kompatibel sind.

In dieser Studie wurden sechs unterschiedliche Komposite aus verschiedenen Materialgruppen (methacrylat-basierte, ormocer-basierte und siloran-basierte Komposite) miteinander für die Reparatur kombiniert. Die für die vorliegende Studie zur Anwendung gebrachte Reparaturmethode ist an die Forschungsergebnisse von *Ivanovas* angelehnt, die bei der Reparatur von siloran- und methacrylat-basierten Kompositen bessere Werte erhielt, wenn eine Silan-Komponente im Haftvermittler enthalten war (Ivanovas et al. 2010). So beinhaltete hier der Vorgang der Füllungsreparatur das Anrauen der Substratoberfläche mit Silikonkarbidpapier und die Verwendung des Reparatursets Clearfil Repair (Kuraray, Japan) nach Herstellerangaben. Die Substratfüllung sowie der Verbund von alter zu neuer Füllung wurde einer künstlichen Alterung in 37 Grad Celsius warmem, destilliertem Wasser (Substrat vier Wochen, Verbund acht Wochen Lagerung) und der Verbund zusätzlich 5000 Zyklen einer Thermowechselbelastungen unterzogen. Anschließend wurden die Verbundfestigkeiten der Prüfkörper mittels einer Universal-Prüfmaschine in einem Schertestverfahren gemessen und das genaue Bruchmuster analysiert. Anhand der Auswertung der Ergebnisse konnte

festgestellt werden, dass die Verbundfestigkeit generell stärker davon abhängt, welches Material als Füllungsmaterial verwendet wurde als davon, welches als Reparaturmaterial zur Anwendung kam. Wenn ein behandelnder Zahnarzt den vorhandenen Substratkomposit nicht identifizieren kann, stellt die Tatsache, dass das Reparaturmaterial eine untergeordnete Rolle spielt, eine Erleichterung für den klinischen Alltag dar.

Generell ergaben die homolog reparierten Proben, also die Reparatur einer Füllung mit dem gleichen Material, sehr zuverlässige Verbundfestigkeiten. Dies kann folglich durchaus als Empfehlung an die Praxis gelten. Wenn ein siloran-basiertes Füllungsmaterial als Substrat vorhanden ist, ist die Methode der homologen Reparatur besonders zu empfehlen, da Filtek Silorane die geringsten Werte als Substratmaterial in Kombination mit allen getesteten Materialien ergab. Jedoch stellt Filtek Silorane ein sehr geeignetes Reparaturmaterial dar, was vermutlich auf die geringe Polymerisationsschrumpfung und das resistente Verhalten gegenüber Thermowechselbelastungen zurückzuführen ist. Auch wenn generell die Frage, ob Komposite verschiedener Matrices miteinander kompatibel sind, mit ‚Ja‘ zu beantworten ist, gibt es trotzdem Ausnahmen, die beachtet werden sollten. So sollte Filtek Silorane beispielsweise als Substratkomposit nicht mit einem Komposit differierender Matrix kombiniert werden. Für die Reparatur eines ormocer-basierten Komposits als Füllungskunststoff hingegen, ergab die Kombination mit allen getesteten Materialien sehr zuverlässige Verbundfestigkeiten. Tetric ceram HB, als Vertreter der stopfbaren Komposite kann generell nicht als Reparaturmaterial empfohlen werden, da aufgrund der hohen Viskosität höchstwahrscheinlich eine geringere Benetzbarkeit zum vorhandenen Substrat stattfindet. Betrachtet man den genauen Bruchmodus der Prüfkörper, korrelieren hohe Verbundfestigkeiten mit dem Muster der kohäsiven Fraktur, wogegen bei geringen Festigkeiten ein vermehrtes Auftreten vom adhäsiven Bruchmodus zu beobachten war.

Es ist zu erwarten, dass das Spektrum verfügbarer Kompositmaterialien weiterhin eine ständige Entwicklung erfahren wird. Gerade Materialien neuer Matrices fordern weiteren Forschungsbedarf zur Reparatur von Kompositfüllungen. Die vorliegende Studie kann somit lediglich einen Bruchstein zur Klärung der behandelten Forschungsfragen darstellen, fügt sich aber dennoch richtungsweisend in den zahnmedizinischen Diskurs zur Reparatur dentaler Restaurationskomposite und dessen Grundsatz “Im Zweifel erhalten” ein.

8 Literaturverzeichnis

Ahlers, M. O., Platzer, U. (1995): Scherfestigkeit bei repariertem Kompositwerkstoff unter verschiedenen Versuchsbedingungen. Dtsch Zahnärztl Z 50: 821-823

Ahlers, M. O. (2006): Intraorale Reparatur zahnfarbener Restaurationen aus Composite-Füllungswerkstoffen. 1. Auflage, Schütersche

Alexandridis, A., Nolden, R. (1984): Neue Erkenntnisse über die Abnutzung von Kompositions- Füllungsmaterialien. Quintessenz. 4:679

Asghar S., Ali A., Rashid S., Hussain T. (2010): Replacement of resin-based composite restorations in permanent teeth. J Coll Physicians Surg Pak. 20(10): 639-43

Bartlett, D., Sundaran, G. (2006): An up to 3-year randomized clinical study comparing indirect and direct resin composites used to restore worn posterior teeth. Int J Prosthodont. 19: 613-617

Black, G. V. (1895): An investigation into the physical characters of the human teeth in relation to their diseases and to practical dental operations, together with the physical characters of filling material. Dent Cosmos. 353-421, 469-484, 553-571, 637-661, 737-757

Boaro, L. C., Goncalves, F., Guimarães, T. C., Ferracane, J. L., Versluis, A., Braga, R. R. (2010): Polymerization stress, shrinkage and elastic modulus of current low-shrinkage restorative composites. Dent mater. 26(12):1144-50

Buonocore, M. G., (1955): A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. J Dent Res. 34: 849-853

Boyer, D. B., Chan, K. C., Torney, D. L. (1978): The strength of multilayer and repaired composite resin. J Prosthet Dent. 39: 63-67

Boyer, D. B., Chan, K.C, Reinhardt, J. W (1984): Build-up and repair of light-cured composites: bond strength. *J Dent Res.* 63: 1241-1244

Brendeke, J., Ozcan, M. (2007): Effect of physicochemical aging conditions on the composite-composite repair bond strength. *J Adhes Dent.* 9(4): 399-406

Brosh, T., Pilo, R., Bichacho, N., Blutsein, R. (1997): Effect of combinations of surface treatments and bonding agents on the bond strength of repaired composites. *J Prosthet Dent.* 77: 122-26

Brunthaler, A., Konig, F., Lucas, T., Sperr, W., Schedle, A. (2003): Longevity of resin composite restorations in posterior teeth. *Clin Oral Investig.* 7: 63-70

Brendeke, J., Ozcan, M. (2007): Effect of physicochemical aging conditions on the composite-composite repair bond strength. *J Adhes Dent.* 9: 399-409

Burke, F. J. T., Sau, W. C., Mjör, I.A., Wilson, N. H. F. (1999): Restoration longevity and reasons for placement and replacement. *Quintessence Int.* 30: 234-242

Cattani-Lorente, M., Dupuis, V., Moya, F., Payan, J., Meyer, J. M. (1999): Comparative study of the physical properties of a polyacid-modified composite resin and a resin-modified glass ionomer cement. *Dent Mater.* 15: 21-32

Cattani-Lorente, M., Bouillaguet, S., Godin, C. H., Meyer, J. M. (2001): Polymerization shrinkage of Ormocer based dental restorative composites. *Eur Cell Mater.* 1: 25-26

Chalkley, Y., Chan, D. (1986): Mikroleakage between light-cured composites and repairs. *The journal of prosthetic dentistry.* Vol 56: No 4

Chan, K. C., Boyer, D. (1983): Repair of conventional and microfilled composite resins. *The journal of prosthetic dentistry.* Vol 50: No 3

- Choi, K. K., Ferrance, L. L., Hilton, T. J., Chalton, D. (2000): Properties of packable dental composites. *J Esthet Dent*. 12: 216-226
- Curtis, A. R., Palin, W. M., Fleming, G. J., Shortal, A. C., Marquis, P. M. (2009): The mechanical properties of nanofilled resin-based composites: Characterizing discrete filler particles and agglomerates using a micromanipulation technique. *Dent mater*. 25:180-7
- Davidson, C. L. and A. J. Feilzer (1997): Polymerization shrinkage and polymerization shrinkage stress in polymer-based restoratives. *J Dent*. 25(6): 435-440
- Dewaele, M., Truffier-Boutry, D., Devaux, J., Leloup, G. (2006): Volume contraction in photocured dental resins: the shrinkage-conversion relationship revisited. *Dent Mater*. 22: 359-65
- Eick, J. D., Smith, R. E., Pinzino, C. S., Kostoryz, E. L. (2006): Stability of silorane dental monomers in aqueous systems. *J Dent*. 34:405-10
- Elderton, R.J. (1990): Clinical studies concerning re-restoration of teeth. *Adv Dent Res*. 4:4-9
- Eliades, G. C., Caputo, A. A. (1989): The strength of layering technique in visible light-cured composites. *J Prosthet Dent*. 61:31-8.
- Ferrance, J. L., Berge, H. X. & Condon, J. R. (1998): In vitro aging of dental composites in water – Effect of degree of conversion, filler volume, and filler/matrix coupling. *J of Biomedical Materials Research*. 42(3): 465-472
- Ferrance, J. L. (2011): Resin composite – State of the art. *Dent Mater*. 27(1):29-38
- Finger, W., Jørgensen, K. D. (1977): Porosität von Kompositfüllungsmaterialien. *Schweiz Mschr Zahnheilk*. 87:482

Forss, H., Widstrom, E. (2004): Reasons for restorative therapy and the longevity of restorations in adults. *Acta Odontol Scand.* 62: 82-86

Frankenberger, R., Krämer, N., Petschelt, A. (2000): Technique sensitivity of dentin bonding: effect of application mistakes on bond strength and marginal adaptation. *Oper Dent.* 25(4): 324-30

Frankenberger, R., Roth, S., Krämer, N., Pelka, M., Petschelt, A. (2003): Effect of preparation mode on Class II resin composite repair. *Journal of Oral Rehabilitation.* 30: 559-564

Glenn, J. F. (1979): Comments on Bowens presentation. *J Dent Res.* 58(5): 1504-1506

Glenn J. F. (1982): Composition and properties of unfilled and composite resin restorative materials. In: Smith D. C., Williams D. F., editors. *Biocompatibility of dental materials*, vol. III. Boca Raton, FL: CRC Press Inc.: 98 – 130

Gordon, V. V., Mjör, I. A., Blum, I. R., Wilson, N. (2003): Teaching students the repair of resin-based composite restorations: a survey of North America dental schools, *J Am Dent Assoc.* 134: 317-23

Gregory, W. A., Pounder, B., Bakus, E. (1990): Bond strength of chemically dissimilar repaired composite resins. *J Prosthet Dent.* 64:664-668

Greiwe, K. S. G. (1990): Ormocere: Eine neue Werkstoffklasse. *FhGBerichte.* 2: 64.

Guggenberger, R. and W. Weinmann (2000): Exploring beyond methacrylates. *Am J Dent.* 13: 82D-84D.

Hahnel, S., Heinrich, A., Bürgers, R., Handel, G., Rosentritt, M. (2010): Investigation of Mechanical Properties of Modern Dental Composites After Artificial Aging for One Year. *Oper Dent.* 35-4: 412-419

Harrison, A., Draughn, R. A. (1976): Abrasive wear, tensile strength and hardness of dental composite resin – is there a real relationship? J Prosthet Dent. 36:395

Heidemann, D. (2005): Kariologie und Füllungstherapie. 4.Auflage, Urban&Fischer

Hellwig, E., Klimek, J., Attin, T. (2007): Einführung in die Zahnerhaltung. 4.Auflage, Urban&Fischer

Hervas-Garcia, A., Martinez-Lozano, M. A., Cabanes-Vila, J., Barjau-Escribano, A., Fosalve, P. (2006): Composite resins. A review of the materials and clinical indications. Med Oral Patol Oral Cir Bucal. 11: E215-20

Hickel, R., Manhart, J. (2001): longevity of restorations in posterior teeth and reasons for failure. J Adhes Dent. 3: 45-64

Hickel, R., W. Dasch, et al. (1999): New direct restorative materials. Ned Tijdschr Tandheelkd. 106(4): 128-140

Hotz, P. (1975): Die Anpolymerisation von Kompositmaterial. Schweiz Monatsschr Zahnmed. 85:608-614

Ilie, N., Hickel, R. (2009): Investigations on mechanical behavior of dental composites. Clin Oral Invest. 13(4):427-38

Ilie, N., Hickel, R. (2009): Macro-, micro- and nano-mechanical investigations on silorane and methacrylate-based composites. Dent Mater. 25, 810-819

Inoue, T. (1978): Repair of restoration materials: repair of amalgam and composite resin used in restorations. Shikai Tenbo. 52: 87-96

Ivanovas, S., Hickel, R., Ilie, N. (2010): How to repair fillings made by silorane-based composites. Clin Oral Invest.

- Junior, S. A., Ferrance, J. L., Bona, A. D. (2008): Influence of surface treatments on the bond strength of repaired resin composite restorative materials. *Dent mater.* 25: 442-451
- Kappert, H. F., Schüren, M. (1996): Dauerfestigkeitsprüfung des Metall-Kunststoffverbundes unter dem Einfluss von Temperaturwechseln. *Quintessence Zahntech.* 22: 293- 307
- Kappert, H., Eichner, K. (2008): Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2, 6.Auflage, Thieme
- Kamann, W. K., Gängler, P. (2000): Filling repair and repair fillings. *Schweiz. Monatsschr. Zahnmed.* 110(10): 1054-71
- Krejci I., Lieber C.M., Lutz F. (1995): Time required to remove totally bonded tooth-colored posterior restorations and related tooth substance loss. *Dent Mater.* 11(1): 34-40
- Kunzelmann, K. H. (1998): Verschleißanalyse und –quantifizierung von Füllungsmaterialien in vivo und in vitro. Shaker Verlag, Aachen
- Lambrechts, P., Braem, M., Vanherle, G. (1987): Buonocore memorial lecture. Evaluation of clinical performance for posterior composite resins and dentin adhesives. *Oper Dent.* 12(2):53-78
- Leprince, J., Palin, W. M., Mullier, T., Devaux, J., Vreven, J., Leloup, G. (2010): Investigating filler morphology and mechanical properties of new low-shrinkage resin composite types. *J Oral Rehabil.* 1;37(5):364-76
- Lien, W., Vandewalle, K.S. (2010): Physical properties of a new silorane-based restorative system. *Dent Mater.* 26:337-344

- Loomans, B.A.C., Vivan Cardoso, M., Roeters, F.J.M., Opdam, N.J.M., De Munck, J., Huysmans, M.C.D.N.J.M., Van Meerbeek, B. (2011): Is there one optimal repair technique for all composites? *Dental Mater.* 27:701-709
- Lucena-Martin, C., Lopez, S., de Mondelo J. (2001): The effect of various surface treatments and bonding agents on the repaired strength of heat-treated composites. *J Prosthet Dent.* 86: 481-488
- Lührs, A., Görmann, B., Jacker-Guhr, S., Guertsen, W. (2011): Repairability of dental siloranes in vitro. *Dental Mater.* 27(2):144-9
- Lutz, F., J. C. Setcos, et al. (1983): Dental restorative resins. Types and characteristics. *Dent Clin North Am.* 27(4): 697-712.
- Magni, E., Ferrari, M., Papacchini, F., Hickel, R., Ilie, N. (2011): Influence of ozone on the composite-to composite bond. *Clin Oral Invest.* 15(2):249-56
- Manhart J, H. B., Mehl A, Kunzelmann KH, Hickel R (1999): Randqualität von Ormocer- und Kompositfüllungen in Klasse-II-Kavitäten nach künstlicher Alterung. *Dtsch Zahnärztl Z.* 54: 89.
- Manhart, J., Kunzelmann, K.-H., Chen, H. Y., Hickel, R. (2000): Mechanical properties and wear behaviour of light-cured and packable composite resins. *Dent Mater.* 16: 33-40
- Maneenut, C., Sakoolnamarka, R., Tyas, M.J. (2010): The repair potential of resin composite materials. *Dent Mater.* 27(2):e20-7
- Maxkors, R., Meiners, H. (2005): Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde. 5. Auflage. Deutscher Zahnärzte Verlag
- Mjör, I A. (1989): Amalgam and composite resin restorations: longevity and reasons for replacement. *Quintessence.* 61-80

Mjör, I A. (1993): Repair versus replacement of failed restorations. *Int Dent J.* 43: 466-472

Mjör, I. A., Toffenetti, F. (2000): Secondary caries: a literature review with case reports, *Quintessence Int.* 31: 165-179

Moncada, G., Martin, J., Fernandez, E. (2009): Sealing, refurbishment and repair of Class I, Class II defective restorations: a three year clinical trial. *J Am Dent Assoc.* 140: 425-432

Moszner, N., Salz, U. (2007): Recent developments of new components for dental adhesives and composites. *Macromol Mater Eng.* 292:245–71.

Mozner, N., Gianasmidis, A., Klapdohr, S., Fischer, U.K., Rheinberger, V. (2008): Sol-gel materials: 2. Light-curing dental composites based on ormocers of cross-linking alkoxysilane methacrylates and further nano-composites. *Dent mater.* 24:851-856

Müh, E., Stieger, M., Klee, J. E., Frey, H., Mülhaupt, R. (2001): Organic-inorganic hybrid networks by the sol-gel process and subsequent photopolymerization. *J of Polymer science: Part A: Polymer Chemistry.* Vol. 39, 4274-4282

Oilo, G. (1993): Bond strength testing--what does it mean? *Int Dent J.* 43(5):492-8

Opdam, N. J., Bronkhorst, E. M., Roeters, J. M., Loomans, B. A. (2007): A retrospective clinical study on longevity of posterior composite and amalgam restorations. *Dent Mater.* 23:2-8

Oxman, J. D., Jacobs, D. W. (2000): Ternary photoinitiators system for curing of epoxy resins. US-Patent 006043295A

Özcan, M., Barbosa, S.H., Melo, R.M., Galhano, G.A.P., Bottino, M.A., (2007): Effect of surface conditioning methods on the microtensile bond strength of resin composite to composite after aging conditions. *Dent Mater.* 23: 1276-1282

- Padipatvuthikul, P., Mair, L.H. (2007): Bonding of composite to water aged composite with surface treatments. *Dent Mater.* 23: 519-525
- Palin, W. M., Fleming, G. J., Burke, F. J., Marquis, P. M., Randall, R. C. (2005): The influence of short and medium-term water immersion on the hydrolytic stability of novel low-shrink dental composites. *Dent Mater.* 21(9):852-63.
- Papacchini, F., Magni, E., Radovic, I., Mazzitelli, C., Monticelli, F., Goracci, C., Polimeni, A., Ferrari, M. (2007): Effect of Intermediate Agents and Pre-heating of Repairing Resin on Composite-repair Bonds. *Operative Dentistry.* 32-4:363-371
- Papacchini, F., Toledano, M., Monticelli, F., Osorio, R., Polimeni, A., García-Godoy, F., Ferrari, M. (2007): Hydrolytic stability of composite repair bond. *Eur J Oral Sci.* 115:417-424
- Papacchini F., Radovic I., Magni E., Goracci C., Monticelli F., Chieffi N., Polimeni A., Ferrari M. (2008): Flowable composites as intermediate agents without adhesive application in resin composite repair. *Am J Dent.* 21:53–58
- Pearson, G. J., Longman, C. M. (1989): Water sorption and solubility of resin-based materials following inadequate polymerization by a visible-light curing system. *J Oral Rehabil.* 16(1):57-61
- Peutzfeldt, A. (1997): Resin composites in dentistry: the monomer systems. *Eur J Oral Sci.* 105(2): 97-116.
- Puckett, A. D., Holder, R., O'Hara, J. W. (1991): Strength of posterior composite repairs using different composite/bonding agent combinations. *Oper dent.* 16:136-40
- Rathke, A., Tymina, Y., Haller, B. (2008): Effect of different surface treatments on the composite-composite repair bond strength. *Clin Oral Invest.* 13:317-323

- Redman, C. D. J., Hemmings, K. W., Good, J. A (2003): The survival and clinical performance of resin-based composite restorations used to treat localized anterior tooth wear. *Br Dent.* 194:566-572
- Rinastiti, M., Özcan, M., Siswomihardjo, W., Busscher, H.J. (2010): Effects of surface conditioning on repair bond strength of non-aged and aged microhybrid, nanohybrid, and nanofilled composite resins. *Clin Oral Invest.*
- Rodrigues J., S.A., Scherrer, S.S., Ferracane, J.L., Bona, Á.D. (2008): Microstructural characterization and fracture behavior of a microhybrid and a nanofill composite. *Dent Mater.* 24:1281-1288
- Roeters, F. J., L. C. de Jong, et al. (2009): Change to a new composite with low shrinkage not sensible at this point. *Ned Tijdschr Tandheelkd.* 116(1):10-15
- Roulet, J. F., Mettler, P., Friedrich, U. (1980): Studie über die Abrasion von Kompositen im Seitenzahnbereich - Resultate nach drei Jahren. *Dtsch Zahnärztl Z.* 35:493
- Roulet, J. F., T. Hirt, et al. (1984): Surface roughness and marginal behaviour of experimental and commercial composites: an in vitro study. *J Oral Rehabil.* 11(5):499-509
- Roulet, J. F. (1987): A materials scientist's view: assessment of wear and marginal integrity. *Quintessence Int.* 18(8):543-42
- Uhl, A., Michaelis, C., Mills, R.W., Jandt, K.D. (2003): The influence of storage and indenter load on the Knoop hardness of dental composites polymerized with LED and halogen technologies. *Dent Mater.* 20:21-28
- Sabbagh, J., Vreven, J., Leloup, G.(2002): Dynamic and static moduli of elasticity of resin-based materials. *Dent Mater.* 18:64–71

- Schweikl, H., Schmalz, G., Weinmann, W. (2004): The Induction of Gene Mutations and Micronuclei by Oxiranes and Siloranes in Mammalian cells in vitro. *J Dent Res.* 83(1):17-21
- Shahdad, S. A., Kennedy, J. G. (1998): Bond strength of repaired anterior composite resins: an in vitro study. *J Dent.* 26:685-94
- Sharif, M.O., Federowicz, Z., Tickle, M., Brunton, P.A. (2010): Repair or replacement of restorations: do we accept built in obsolescence or do we improve the evidence? *British Dental J.* Vol.209 No.4
- Shen, C., Mondragon, E., Gordan, V.V., Mjör, I.A. (2004): The effect of mechanical undercuts on the strength of composite repair. *J Am Dent Assoc.* 135:1406-1412
- Sideridou, I. D., Achilias, D. S. (2005): Elution study of unreacted Bis-GMA, TEGDMA, UDMA, and Bis-EMA from light-cured dental resins and resin composites using HPLC. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 74(1):617-26
- Söderholm, K. J., Zigan, M., Raga, M., Fischlschweiger, W., Bergmann, M. (1984): Hydrolytic degradation of dental composites. *J Dent Res.* 63:1248-1254
- Swift, E. L. Jr., Cloe, BC., Boyer, DB. (1994): Effect of a silane coupling agent on composite repair strengths. *Am J Dent.* 7:200-202
- Tagtekin, D. A., Yanikoglu, C. F., Bozkurt, F. O., Kologlu, B., Sur, H. (2004): Selected characteristics of an Ormocer and a conventional hybrid resin composite. *Dent mater.* 20:487-497
- Tezvergil, A., Lassila, L. V., Vallittu, P. K. (2003): Composite-composite repair bond strength: effect of different adhesion primers. *J Dent.* 31:521-5
- Tezvergil-Mutluay, A., Lassila, L. V., Vallittu, P. K. (2008) Incremental layers bonding of silorane composite: the initial bonding properties. *J Dent.* 36:560–563

Ulrich G., Herzog D., Liska R., Gruber H., Burtscher P., Moszner N. (2003): Synthesis and Photoactivity of new Camphorquinone Derivates. 6. Austrian Polymer Meeting 21. International H.F. Mark. Symposium

Vankerhoven, H., Lambrechts, P., Van Beylen, M., Davidson, CL., Vanherle, G. (1982): Unreacted methacrylate groups on the surfaces of composite resins. J Dent Res. 61:791-795

Versluis, A., Douglas, W. H., Cross, M., Sakaguchi, R. L. (1996): Does an incremental filling technique reduce polymerization shrinkage stresses? J Dent Res. 75, 871

Versluis, A., Tantbirojn, D. (1998): Do dental composites always shrink toward the light? J Dent Res. 77(6):1435-1445

Weinmann, W., Thalacker, C., Guggenberger, R. (2005): Siloranes in dental composites. Dent Mater. 21:68-74

Wegmann, U., M. Darwish, et al. (1983): In-vitro studies of the surface structures of various composite filling materials. ZWR. 92(11):32-36.

Yap, A. U., Tan, C. H., Chung, S. M. (2004): Wear behaviour of new composite restoratives. Oper dent. 29:269-274

Yesilyurt, C., Kusgoz, A., Bayram, M., Ulker, M. (2009): Initial Repair Bond Strength of a Nano-filled Hybrid Resin: Effect of surface Treatments and Bonding Agents. J Esthet Restor Dent. 21(4):261